



**АКТУАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ
ТЕПЛОФИЗИКИ,
ЭНЕРГЕТИКИ
И ГИДРОГАЗОДИНАМИКИ
В УСЛОВИЯХ АРКТИКИ**

**Киров
2021**



АКТУАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ ТЕПЛОФИЗИКИ, ЭНЕРГЕТИКИ И ГИДРОГАЗОДИНАМИКИ В УСЛОВИЯХ АРКТИКИ

Тезисы Всероссийской научно-практической конференции
с международным участием,
посвященной 85-летию со дня рождения
заслуженного деятеля науки РФ и ЯАССР,
д. т. н., профессора Э. А. Бондарева
(12–17 июля 2021 г., г. Якутск)

УДК (622.32+621.643) 791.052:539.56 536.24:532.518
ББК 31.31
А43

DOI 10.52376/978-5-907419-59-9

Утверждено к печати Ученым советом ИФТПС СО РАН,
Ученым советом ИПНГ СО РАН

Редакционная коллегия:

Т. А. Капитонова (отв. редактор), **В. В. Лепов**, **В. А. Будугаева**, **Л. П. Калачева**,
О. Н. Кравцова, **Н. А. Протодяконова**, **Н. И. Таппырова**, **И. И. Рожин**, **С. Д. Мордовской**

А43 Актуальные вопросы теплофизики, энергетики и гидрогазодинамики в условиях Арктики [Электронный ресурс]: тезисы Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, посвященной 85-летию со дня рождения заслуженного деятеля науки РФ и ЯАССР, д. т. н., профессора Э. А. Бондарева (12–17 июля 2021 г., г. Якутск). – Электрон. текст. дан. (25,9 Мб). – Киров: Изд-во МЦИТО, 2021. – 1 электрон. опт. диск (CD-R). – Систем. требования: PC, Intel 1 ГГц, 512 Мб RAM, 25,9 Мб свобод. диск. пространства; CD-привод; ОС Windows XP и выше, ПО для чтения pdf-файлов. – Загл. с экрана. DOI 10.52376/978-5-907419-59-9

ISBN 978-5-907419-59-9

Научное электронное издание

В сборнике представлены тезисы докладов по направлениям: теплофизика и теплотехника, геотеплофизика, энергетика, моделирование и численные методы решения задач тепло-массообмена и гидрогазодинамики. Рассмотрены фундаментальные и прикладные проблемы нестационарной теплотехники, неравновесные условия вблизи межфазной границы при фазовом превращении, измерения высокоинтенсивных потоков в условиях арктического холода. Значительное место уделено вопросам транспортировки углеводородов при низких температурах, испытанию установок по газификации твердого органического топлива, проблемам экологии загрязнения почвы нефтяными выбросами в условиях криолитозоны, использованию солнечной и ветровой энергии в условиях Севера и Арктики, перспективам использования угля в Республике Саха (Якутия). Особое место уделено вопросам образования и диссоциации газовых гидратов, ингибиторам гидратообразования с более высокой антигидратной активностью и перспективным антигидратным реагентам. Рассматриваются возможности образования двойных гидратов высокополярными молекулами и азотсодержащими соединениями; численные методы решения задач тепло-массообмена и гидрогазодинамики. Полученные данные могут стать основой для развития газогидратных технологий хранения и транспортировки газов, разделения газовых смесей и опреснения воды.

Сборник предназначен для широкого круга научных и инженерно-технических работников, преподавателей, студентов и аспирантов, занимающихся вопросами нефтегазового и топливно-энергетического комплекса, изменением фазового состояния вещества, моделированием фильтрации жидкостей в вязкоупругих и пористых средах. Материалы публикуются в авторских вариантах.

ISBN 978-5-907419-59-9

УДК (622.32+621.643) 791.052:539.56 536.24:532.518
ББК 31.31

© АНО ДПО «Межрегиональный центр инновационных технологий в образовании», 2021
© Институт проблем нефти и газа Сибирского отделения Российской академии наук, 2021
© Коллектив авторов, 2021



Посвящается 85-летию Эдуарда Антоновича Бондарева, доктора технических наук, профессора, выдающегося ученого, одного из создателей современного раздела подземной гидравлики и неизотермической фильтрации газа.

Конференция проводилась при поддержке

Министерства науки и высшего образования Российской Федерации
Сибирского отделения Российской академии наук
Института физико-технических проблем Севера им. В. П. Ларионова СО РАН
Института проблем нефти и газа СО РАН
Северо-Восточного федерального университета им. М. К. Аммосова
Института мерзлотоведения им. П. И. Мельникова СО РАН
Института горного дела Севера СО РАН
Академии наук Республики Саха (Якутия)

Содержание

ЧАСТЬ I

Теплофизика и теплотехника

Печеркин Н. И., Павленко А. Н., Володин О. А., Катаев А. И., Миронова И. Б., Дас М. К. ТЕПЛООБМЕН ПРИ ПЛЕНОЧНОМ ОХЛАЖДЕНИИ ПАКЕТА ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ ТРУБ С РАЗВИТОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ.....	14
Пилипенко Н. В., Заричняк Ю. П., Иванов В. А., Колодийчук П. А. ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНО-РАЗНОСТНАЯ МОДЕЛЬ ТЕПЛОПЕРЕНОСА В НЕСТАЦИОНАРНОЙ ТЕПЛОМЕТРИИ.....	16
Sameer Khandekar GOING BEYOND CONVENTIONAL HEAT PIPES: NEW DEVELOPMENTS IN PASSIVE THERMAL MANAGEMENT SYSTEMS	17
Родионов А. С. РАСЧЕТ ТЕМПЕРАТУРЫ ТУРБУЛЕНТНЫХ И ЛАМИНАРНЫХ ПОТОКОВ НЕФТИ В СКВАЖИНЕ С ПОМОЩЬЮ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА	19
Бородина К. А. АНАЛИЗ ПОВЕДЕНИЯ НЕРАВНОМЕРНО НАГРЕТОЙ ПЛЕНКИ БИНАРНОГО ГОМОГЕННОГО РАСТВОРА	22
Великин С. А., Чжан Р. В., Минова Е. Н. ГЕОКРИОЛОГИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ В КРИОЛИТОЗОНЕ	24
Алексеев А. А., Сыромятникова А. С., Большев К. Н., Иванов В. А. МЕХАНИЗМ И КРИТЕРИИ ВЕТВЛЕНИЯ ТРЕЩИНЫ	26
Алексеев Р. З., Андреев А. С., Семенов С. О., Лукин Е. С., Федоров М. В. ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН СВЧ-ДИАПАЗОНА НА ТЕМПЕРАТУРНОЕ ПОЛЕ ЗАМЕРЗШИХ БИОЛОГИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ.....	28
Гатапова Е. Я., Граур И. А. НЕРАВНОВЕСНЫЕ УСЛОВИЯ ВБЛИЗИ МЕЖФАЗНОЙ ГРАНИЦЫ ЖИДКОСТЬ-ПАР ПРИ ФАЗОВОМ ПРЕВРАЩЕНИИ.....	29
Заричняк Ю. П., Иванов В. А., Марова А. А., Николаев И. Н., Пилипенко Н. В. СТРУКТУРА И ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ МНОГОСЛОЙНЫХ «НАНОЛУКОВИЦ» НИТРИДА БОРА ИЗ ГРУППЫ МАЛЫХ РАЗМЕРОВ $2 < D < 30$ НМ	32
Заричняк Ю. П., Иванов В. А., Марова А. А., Николаев И. Н., Ходунков В. П. МОДЕЛИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И ПРОЦЕССОВ ПЕРЕНОСА ТЕПЛА В ЗАСЫПКАХ МИКРО- И НАНОПОРОШКОВ АЛЮМИНИЯ.....	33
Ерофеевская Л. А. ПОДХОДЫ К РЕШЕНИЮ ЗАДАЧ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ КОЭФФИЦИЕНТОВ МАССО- И ТЕПЛООБМЕНА ПРИ АППАРАТНОМ КУЛЬТИВИРОВАНИИ МИКРООРГАНИЗМОВ-БИОДЕСТРУКТОРОВ	35
Заричняк Ю. П., Горбунова А. Ю., Иванов В. А., Пилипенко Н. П., Коваленко А. Н. ИЗМЕНЕНИЕ СТРУКТУРЫ И ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ СМЕРЗАЮЩИХСЯ ЗАСЫПОК КОЛОТОГО ЛЬДА	37
Заричняк Ю. П., Горбунова А. Ю., Иванов В. А., Кораблев В. А., Коваленко А. Н. АНАЛИТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОЙ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ УГЛЕРОДНЫХ КОЛОССАЛЬНЫХ МЕЗОТРУБОК.....	38
Курилко А. С., Попенко Ф. Е., Хохолов Ю. А., Романова Е. К. ПРОГНОЗ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА НАСЫПНЫХ ГРУНТОВ СКЛОНА С УЧЕТОМ РАБОТЫ СЕЗОННО-ОХЛАЖДАЮЩИХ УСТРОЙСТВ В УСЛОВИЯХ КРИОЛИТОЗОНЫ.....	39
Росляков П. В., Проскурин Ю. В., Гриша Б. Г., Ионкин И. Л. АВТОНОМНЫЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫЕ КОМПЛЕКСЫ НА СЫРОЙ НЕФТИ ДЛЯ РАБОТЫ В АРКТИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ	41
Семенов С. О., Саввинова Н. А., Андреев А. С. ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООВОГО СОСТОЯНИЯ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОМ НАГРЕВЕ В СВЧ-ДИАПАЗОНЕ.....	43

D. Sc. O. B. Tsvetkov, Ph. D. Yu. A. Laptev, Ph. D. V. V. Mitropov, D. Sc. A. V. Sharkov ENERGOENVIRONMENTAL WORLD TENDENCES AND PRIORITIES IN DEVELOPMENT OF HEAT AND REFRIGERATION TECHNOLOGIES THAT IMPROVE QUALITY OF LIFE.....	44
Шарков А. В., Кораблев В. А., Некрасов А. С. ИЗМЕРЕНИЕ ВЫСОКОИНТЕНСИВНЫХ ТЕПЛОВЫХ ПОТОКОВ В УСЛОВИЯХ АРКТИЧЕСКОГО КЛИМАТА	47
Мордовской С. Д., Данилов Н. Д., Третьяков Э. С., Шадрин В. Ю., Павлов Н. Н. ОПТИМИЗАЦИЯ КОНСТРУКЦИИ ЦОКОЛЬНОЙ ЧАСТИ ЗДАНИЙ, РАЗМЕЩЕННЫХ НА МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ГРУНТАХ.....	49
Лукьянов Г. Н., Рассадина А. А., Неронов Р. В. К ВОПРОСУ О ВЛИЯНИИ ФОРМЫ ПОЛОСТИ НОСА НА ВОЗДУХООБМЕН ПРИ ДЫХАНИИ В УСЛОВИЯХ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУР.....	50
Рожин И. И., Иванов Г. И. ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ ВЛАГОСОДЕРЖАНИЯ ПРИРОДНОГО ГАЗА В ПРИЗАБОЙНОЙ ЗОНЕ И СТВОЛЕ ГАЗОВЫХ СКВАЖИН.....	52
Рожин И. И., Иванов Г. И. МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ ГИДРАТОВ ПРИРОДНОГО ГАЗА ПРИ СОВМЕСТНОЙ РАБОТЕ ПЛАСТА И ГАЗОВОЙ СКВАЖИНЫ	54
Цеева А. Н., Матвеева О. И., Семенова Н. П. ФОРМИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА ГРУНТОВ МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛОГО ОСНОВАНИЯ БУРООПУСКНЫХ СВАЙ.....	56
Тарасов И. И., Малышев А. В. СФЕРИЧЕСКАЯ КОНСТРУКЦИЯ ЗДАНИЯ КАК ВАРИАНТ ДЛЯ СОЛНЕЧНОГО ОТОПЛЕНИЯ В РЕГИОНАХ С ХОЛОДНЫМ КЛИМАТОМ	58
Таппырова Н. И., Кравцова О. Н., Протодяконова Н. А. МОДЕЛЬ ГИСТЕРЕЗИСА КАПИЛЛЯРНОЙ КОНДЕНСАЦИИ В ПОРИСТЫХ ТЕЛАХ	59
Кузьмин С. А., Красильников Д. А., Аргунова А. А., Егорова А. Д., Кацурба М. В. СТАРЕНИЕ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ, МОДИФИЦИРОВАННЫХ ПОЛИМЕРНЫМИ ДОБАВКАМИ, В УСЛОВИЯХ ХОЛОДНОГО КЛИМАТА.....	61
Большев К. Н., Иванов В. А., Малышев А. В., Таппырова Н. И. НЕСТАЦИОНАРНЫЙ МЕТОД ОДНОТОЧЕЧНОГО ТЕМПЕРАТУРНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ТВЕРДЫХ МАТЕРИАЛОВ.....	63
Гатапова Е. Я. ДИНАМИКА ПУЗЫРЕЙ В ТОНКОЙ ПЛЕНКЕ ЖИДКОСТИ И ИСПАРЕНИЕ КАПЕЛЬ НАНО- И ПИКОЛИТРОВОГО ОБЪЕМА	64
Лепов В. В., Архангельская Е. А., Ачикасова В. С., Григорьев А. В. ИССЛЕДОВАНИЯ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОГО ВЯЗКО-ХРУПКОГО ПЕРЕХОДА В СТАЛЯХ И СПЛАВАХ: СТРУКТУРНЫЙ И ФИЗИЧЕСКИЙ АСПЕКТЫ	66
Малышев А. В., Степанов А. А., Таппырова Н. И. УСТАНОВКА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ МАТЕРИАЛОВ НЕРАЗРУШАЮЩИМ МЕТОДОМ ПОВЕРХНОСТНОГО НАГРЕВА.....	68
Степанов А. А., Степанов А. В., Кравцова О. Н., Таппырова Н. И. ЗАВИСИМОСТЬ КОЛИЧЕСТВА НЕЗАМЕРЗШЕЙ ВОДЫ ОТ pH ПОРОВОГО РАСТВОРА.....	69
Газовые гидраты	
Ayaz Ahamad Ansari*, Randeep Ravesh, Pradipta Kumar Panigrahi, Malay Kumar Das EFFECT OF SAND PARTICLES SIZE ON THE CO ₂ HYDRATE FORMATION IN THE POROUS MEDIA	71
Rahul Yadav, Malay K Das, Pradipta K Panigrahi ENHANCED GAS RECOVERY FROM METHANE HYDRATE RESERVOIRS USING DEPRESSURIZATION AND MULTIPLE MICROWAVE RADIATION SOURCES	72
Бикбулатова Э. М., Стопорев А. С., Семенов А. П., Манаков А. Ю. ДВОЙНЫЕ КЛАТРАТНЫЕ ГИДРАТЫ С «НЕКЛАССИЧЕСКИМИ» ГИДРАТООБРАЗОВАТЕЛЯМИ.....	74
Бородин С. Л. МОДЕЛЬНАЯ ТЕПЛОВАЯ ЗАДАЧА О РАЗЛОЖЕНИИ ГИДРАТА МЕТАНА В ЗАМКНУТОМ ПОРИСТОМ РЕЗЕРВУАРЕ	75
Варфоломеев М. А., Фархадян А., Павельев Р. С., Стопорев А. С., Зарипова Ю. Ф., Ярковой В. В. ИССЛЕДОВАНИЕ СИНЕРГЕТИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА СУЛЬФИРОВАННЫХ САХАРОВ С КОММЕРЧЕСКИМИ ИНГИБИТОРАМИ ГИДРАТООБРАЗОВАНИЯ	76

Варфоломеев М. А., Павельев Р. С., Стопорев А. С., Семенов М. Е., Зарипова Ю. Ф., Ярковой В. В., Фархадиан А., Валиуллин Л. Р. НОВЫЙ ПРОМОТОР ГИДРАТООБРАЗОВАНИЯ НА ОСНОВЕ СУЛЬФИРОВАННОГО КАСТОРОВОГО МАСЛА	78
Варфоломеев М. А., Павельев Р. С., Стопорев А. С., Семенов М. Е., Зарипова Ю. Ф., Ярковой В. В., Фархадиан А., Виноградова С. С. РАЗРАБОТКА НОВЫХ БИФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ИНГИБИТОРОВ ГИДРАТООБРАЗОВАНИЯ И КОРРОЗИИ НА ОСНОВЕ ВОДОРАСТВОРИМЫХ ПОЛИУРЕТАНОВ	80
Власов В. А. МОДЕЛИРОВАНИЕ КИНЕТИКИ ОБРАЗОВАНИЯ ГАЗОВОГО ГИДРАТА ИЗО ЛЬДА	81
Гец К. В., Жданов Р. К., Божко Ю. Ю., Белослудов В. Р. МОЛЕКУЛЯРНО-ДИНАМИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ И СКОРОСТИ ОБРАЗОВАНИЯ ГАЗОВОГО ГИДРАТА ИЗ МОРСКОЙ ВОДЫ	84
Давлетшина М. Р., Столповский М. В., Чиглинцева А. С. ОСОБЕННОСТИ РАЗЛОЖЕНИЯ ГАЗОВЫХ ГИДРАТОВ ТЕПЛОВЫМ ВОЗДЕЙСТВИЕМ	85
Жданов Р. К., Гец К. В., Божко Ю. Ю., Белослудов В. Р. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ СТАБИЛЬНОСТИ ГАЗОВЫХ ГИДРАТОВ В ПРИСУТСТВИИ МОРСКОЙ ВОДЫ	86
Жостков Р. А., Собисевич А. Л., Суетнова Е. И. ГАЗОВЫЕ ГИДРАТЫ, ПРИУРОЧЕННЫЕ К ГЛУБОКОВОДНЫМ ГРЯЗЕВЫМ ВУЛКАНАМ	88
Заводовский А. Г., Мадыгулов М. Ш., Рогов В. В. ПОРОВАЯ СТРУКТУРА ГАЗОГИДРАТА ФРЕОНА-12	90
Заводовский А. Г., Мадыгулов М. Ш. ОБРАЗОВАНИЕ ГАЗОВЫХ ГИДРАТОВ ИЗО ЛЬДА В ПРИСУТСТВИИ ПОЛИВИНИЛПИРРОЛИДОНА	92
Поденко Л. С., Драчук А. О., Молокитина Н. С., Нестеров А. Н. ПОЛУЧЕНИЕ ГАЗОВЫХ ГИДРАТОВ С ПОМОЩЬЮ ВОДНЫХ ДИСПЕРСНЫХ МАТЕРИАЛОВ, СТАБИЛИЗИРОВАННЫХ ГИДРОФОБНЫМИ НАНОЧАСТИЦАМИ	94
Молокитина Н. С., Поденко Л. С., Плетнева К. А., Берендеева О. Е., Драчук А. О. ЯМР-ИССЛЕДОВАНИЕ МАТЕРИАЛОВ, СОДЕРЖАЩИХ ПОЛИВИНИЛОВЫЙ СПИРТ, ПЕРСПЕКТИВНЫХ ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В ГАЗОГИДРАТНЫХ ТЕХНОЛОГИЯХ	96
Насыров А. А., Чиглинцева А. С., Чиглинцев И. А. МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЗЛОЖЕНИЯ ГАЗОГИДРАТА В «КУПОЛЕ-СЕПАРАТОРЕ» ИЗ МАТЕРИАЛА «СТАЛЬ – 20»	98
Нестеров А. Н., Решетников А. М. ИНТЕНСИФИКАЦИЯ РОСТА ГИДРАТОВ CO ₂ В НЕПЕРЕМЕШИВАЕМОМ РЕАКТОРЕ	100
Семенов А. П., Мендгазиев Р. И., Стопорев А. С., Истомин В. А., Сергеева Д. В., Винокуров В. А. ДИМЕТИЛСУЛЬФОКСИД КАК ИНГИБИТОР ГИДРАТООБРАЗОВАНИЯ МЕТАНА И ДИОКСИДА УГЛЕРОДА: ФАЗОВЫЕ РАВНОВЕСИЯ, ТЕМПЕРАТУРА ЗАМЕРЗАНИЯ, ПЛОТНОСТЬ И ВЯЗКОСТЬ ВОДНЫХ РАСТВОРОВ	102
Семенов М. Е., Павельев Р. С., Фархадиан А., Варфоломеев М. А. ИНГИБИТОРЫ РОСТА ГАЗОВЫХ ГИДРАТОВ НА ОСНОВЕ СУЛЬФИРОВАННОГО ХИТОЗАНА	104
Ситдикова Л. Ф., Гималтдинов Л. К. ДИНАМИКА ЗВУКОВЫХ ВОЛН ПРИ НАКЛОННОМ ПАДЕНИИ НА ГРАНИЦУ РАЗДЕЛА МЕЖДУ ПОРИСТОЙ СРЕДОЙ, НАСЫЩЕННОЙ ПУЗЫРЬКОВОЙ ЖИДКОСТЬЮ И ВОДОЙ	106
Стопорев А., Семенов М. Е., Зарипова Ю. Ф., Семенов А. П., Варфоломеев М. А., Манаков А. Ю. МНОГОСТАДИЙНОСТЬ ПРОЦЕССА ОБРАЗОВАНИЯ ГАЗОВЫХ И ИОННЫХ КЛАТРАТНЫХ ГИДРАТОВ: РАЗНОВИДНОСТИ И ПРИЧИНЫ ПРОЯВЛЕНИЯ	108
Хасанов М. К., Столповский М. В. ЗАКАЧКА УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА В МЕТАНОГИДРАТНЫЙ ПЛАСТ С ОТРИЦАТЕЛЬНОЙ ТЕМПЕРАТУРОЙ	110
Семенов А. П., Мендгазиев Р. И., Стопорев А. С., Хлебников В. Н., Сергеева Д. В., Истомин В. А. СМЕСЕВОЙ СИНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ИНГИБИТОР ГИДРАТООБРАЗОВАНИЯ НА ОСНОВЕ ХЛОРИДА МАГНИЯ И МЕТАНОЛА	112
Калачева Л. П., Иванова И. К., Портнягин А. С., Аргунова К. К., Николаев А. И., Чайникова А. А. ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ДИСПЕРСНОСТИ СРЕДЫ НА ПРОЦЕССЫ ОБРАЗОВАНИЯ И РАЗЛОЖЕНИЯ ГИДРАТОВ ПРИРОДНОГО ГАЗА	114

Иванова И. К., Калачева Л. П., Портнягин А. С., Аргунова К. К. ИЗУЧЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ ГИДРАТОВ ПРИРОДНОГО ГАЗА В ДИСПЕРСНЫХ ПОРОДАХ, ЗАСОЛЕННЫХ ХЛОРИДОМ НАТРИЯ	116
Калачева Л. П., Иванова И. К., Портнягин А. С., Рожин И. И., Аргунова К. К., Николаев А. И. ОСОБЕННОСТИ ГИДРАТООБРАЗОВАНИЯ В РАСТВОРАХ ГИДРОКАРБОНАТА НАТРИЯ	118
Нестеров А. Н., Решетников А. М. МЕХАНИЗМ И КИНЕТИКА ГИДРАТООБРАЗОВАНИЯ МЕТАНА В РАСТВОРАХ ХЛОРИДА НАТРИЯ	120

Геотеплофизика

Варламов С. П., Скрыбин П. Н. ДИНАМИКА ТЕПЛОВОГО РЕЖИМА СИЛЬНОЛЬДИСТОГО ГРУНТОВОГО ОСНОВАНИЯ ЖЕЛЕЗНОЙ ДОРОГИ ПРИ ПРИМЕНЕНИИ ИННОВАЦИОННЫХ ПРИЕМОВ	122
Варламов С. П., Скачков Ю. Б., Скрыбин П. Н. УСТОЙЧИВОСТЬ МЕРЗЛОТНЫХ ЛАНДШАФТОВ КРИОЛИТОЗОНЫ ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЯКУТИИ К СОВРЕМЕННОМУ ПОТЕПЛЕНИЮ КЛИМАТА	124
Ефремов В. Н. ВЛИЯНИЕ СЕЗОННЫХ КОЛЕБАНИЙ ТЕМПЕРАТУРЫ МЕРЗЛЫХ ГРУНТОВ НА СТЕПЕНЬ ИХ РАСТЕПЛЕННОСТИ И ПРОМОРОЖЕННОСТИ ПО ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ ХАРАКТЕРИСТИКАМ	126
Заболотник С. И., Заболотник П. С. ФОРМИРОВАНИЕ ТАЛИКОВ В ОСНОВАНИИ ЗДАНИЙ ЯКУТСКОЙ ТЕПЛОВОЙ ЭЛЕКТРОЦЕНТРАЛИ В ПРОЦЕССЕ ЕЁ ДЛИТЕЛЬНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ	128
Каймонов М. В. УПРАВЛЕНИЕ ТЕПЛОВЫМ РЕЖИМОМ РУДНОГО ШТАБЕЛЯ ПРИ КУЧНОМ ВЫЩЕЛАЧИВАНИИ ЗОЛОТА В УСЛОВИЯХ КРИОЛИТОЗОНЫ	130
Каймонов М. В. ОЦЕНКА УСТОЙЧИВОСТИ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ ГОРНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ В УСЛОВИЯХ КРИОЛИТОЗОНЫ	132
Капитонова В. С., Константинова Т. И., Пермяков П. П. БИОПЛАТО ДЛЯ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД В МАЛЫХ НАСЕЛЕННЫХ ПУНКТАХ	135
Кириллин А. Р. ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ СНЕЖНОГО ПОКРОВА НА ТЕМПЕРАТУРНЫЙ РЕЖИМ ПОРОД ЭЛЬКОНСКОГО ГОРСТА	136
Кириллин А. Р. МОЩНОСТЬ КРИОЛИТОЗОНЫ НА ЛЕНА-АЛДАНСКОМ МЕЖДУРЕЧЬЕ (ЧУРАПЧИНСКИЙ УЛУС)	138
Ерёмин И. И., Кропачев Д. Ю., Пугач В. Н. ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ И НОВЫЕ РАЗРАБОТКИ СИСТЕМ МОНИТОРИНГА ТЕМПЕРАТУРЫ ВЕЧНОМЕРЗЛЫХ ГРУНТОВ ПРОИЗВОДСТВА АО «НПП «ЭТАЛОН»»	139
Попов В. И. РОЛЬ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА В ПРОЦЕССЕ МОРОЗНОГО ВЫВЕТРИВАНИЯ ПОВЕРХНОСТИ ГОРНЫХ ПОРОД	141
Скрыбин П. Н., Варламов С. П. ВЛИЯНИЕ АНТРОПОГЕННЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА ТЕПЛОВОЕ СОСТОЯНИЕ ГРУНТОВ ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЯКУТИИ	142
Калиничева С. В. ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДА ТЕПЛОВОЙ ИНФРАКРАСНОЙ СЪЕМКИ ПРИ ИДЕНТИФИКАЦИИ МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ПОРОД В ГОРНЫХ РАЙОНАХ КРИОЛИТОЗОНЫ	144

Энергетика

Гатапова Е. Я., Sahu G., Khandekar S., Hu R. ОХЛАЖДЕНИЕ МОЩНОГО СВЕТОДИОДНОГО МОДУЛЯ	147
Глянцева Ю. С., Зуева И. Н., Лифшиц С. Х., Чалая О. Н. ОСОБЕННОСТИ ДЕСТРУКЦИИ НЕФТЯНЫХ УГЛЕВОДОРОДОВ В ПОЧВАХ ОБЪЕКТОВ ТОПЛИВНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА ЯКУТИИ	148
Лифшиц С. Х., Чалая О. Н., Глянцева Ю. С., Зуева И. Н. ФИТОРЕМЕДИАЦИЯ НЕФТЕЗАГРЯЗНЕННЫХ ПОЧВ КРИОЛИТОЗОНЫ	151
Ефимов Н. К., Васильев П. Ф. ПРОБЛЕМЫ И ВОЗМОЖНЫЕ ВАРИАНТЫ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ДИЗЕЛЬНОЙ ГЕНЕРАЦИИ	153

Ефимов С. Е.	
ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВОЛОКНИСТЫХ ПОЛИМЕРНЫХ СОРБЕНТОВ НА ПРИМЕРЕ С-ВЕРАД ДЛЯ ЛИКВИДАЦИИ РАЗЛИВОВ НЕФТИ И НЕФТЕПРОДУКТОВ	154
Ефремов В. Н.	
ОБНАРУЖЕНИЕ РМТ-ЗОНДИРОВАНИЕМ ЕСТЕСТВЕННЫХ И ТЕХНОГЕННЫХ ПРОВОДЯЩИХ ЗОН В МЕРЗЛЫХ ГРУНТАХ ДЛЯ УСТРОЙСТВА ЗАЗЕМЛЕНИЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ	156
Кулагин В. А., Радзюк А. Ю., Истягина Е. Б.	
РАЗВИТИЕ ТЕХНИКИ ЭКСПЕРИМЕНТА В ОБЛАСТИ СУПЕРКАВИТАЦИОННЫХ ТЕЧЕНИЙ	158
Местников Н. П., Васильев П. Ф.	
РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ОБЪЕКТОВ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ МАЛОЙ МОЩНОСТИ В УСЛОВИЯХ ХОЛОДНОГО КЛИМАТА СЕВЕРА И АРКТИКИ.....	160
Местников Н. П., Васильев П. Ф.	
РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ОБЪЕКТОВ ВЕТРОВОЙ ЭНЕРГЕТИКИ МАЛОЙ МОЩНОСТИ В УСЛОВИЯХ ХОЛОДНОГО КЛИМАТА СЕВЕРА И АРКТИКИ.....	162
Местников Н. П., Васильев П. Ф.	
ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РЕЗКО-КОНТИНЕНТАЛЬНОГО КЛИМАТА ЯКУТИИ НА ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ПАНЕЛЕЙ	164
Кораблев В. А., Минкин Д. А., Шарков А. В.	
ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТЕПЛОВОГО РЕЖИМА УГЛЕВОДОРОДНОГО ТОПЛИВА ПРИ ЕГО ТРАНСПОРТИРОВКЕ В УСЛОВИЯХ ПОНИЖЕННЫХ ТЕМПЕРАТУР	166
Korablev V. A., Minkin D. A., Sharkov A. V.	
HYDROCARBONIC FUEL HEAT REGIME PROVIDING IN PROCESS OF ITS TRANSPORTING AT LOW TEMPERATURE CONDITIONS.....	167
Николаева Н. А.	
СИСТЕМАТИЗАЦИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КОМПЛЕКСНОЙ ОЦЕНКИ ВОЗДЕЙСТВИЯ ОБЪЕКТОВ ЭНЕРГЕТИКИ НА ПРИРОДНУЮ СРЕДУ АРКТИЧЕСКОГО СЕКТОРА ЯКУТИИ.....	168
Рахлеев А. М.	
ВМ В ЭНЕРГЕТИКЕ.....	170
Страшников А. В.	
АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ПУСКО-НАЛАДОЧНЫХ И ТЕПЛОВЫХ ИСПЫТАНИЙПИЛОТНОЙ КОГЕНЕРАЦИОННОЙ УСТАНОВКИ НА ОСНОВЕ ГАЗИФИКАЦИИ ТВЕРДОГО ОРГАНИЧЕСКОГО ТОПЛИВА.....	171
Ерофеевская Л. А.	
ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ И ЛИМИТИРУЮЩИЕ ФАКТОРЫ НА ЭТАПАХ БИОРЕМЕДИАЦИИ НЕФТЕЗАГРЯЗНЕННЫХ ЗЕМЕЛЬ В УСЛОВИЯХ КРИОЛИТОЗОНЫ	173
Бескрованов В. В.	
ОСОБЕННОСТИ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ АЛМАЗОВ РАЗНЫХ ФИЗИЧЕСКИХ ТИПОВ.....	175
Афанасьев Д. Е., Ли-Фир-Су Р. П.	
СПОСОБ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СРЕДНЕЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ОДНОТИПНЫХ ОБЪЕКТОВ ИЛИ ОБЪЕКТА С РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ	176
Кобылин В. П., Ли-Фир-Су Р. П.	
УСТРОЙСТВО ДЛЯ ЛИКВИДАЦИИ ГИДРАТНЫХ И ПАРАФИНОВЫХ ОТЛОЖЕНИЙ В НЕФТЯНЫХ СКВАЖИНАХ	178
Павлов Н. В., Такайшвили Л. Н.	
ТЕНДЕНЦИИ И ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РЕСУРСОВ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УГЛЕЙ РЕСПУБЛИКИ САХА (ЯКУТИЯ)	179
Давыдов Г. И., Ли-Фир-Су Р. П., Кобылин В. П.	
ПРОТЯЖЁННЫЕ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ С РАССРЕДОТОЧЕННЫМИ МАЛЫМИ НАГРУЗКАМИ	181
Хоютанов А. М., Васильев П. Ф., Давыдов Г. И.	
ПРИМЕНЕНИЕ ОПТИМИЗАЦИОННЫХ МЕТОДОВ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЯХ 10/0,4 КВ	184
Капитонова Т. А., Стручкова Г. П., Ефремов П. В.	
АНАЛИЗ ПРИЧИН ОТКАЗОВ И АВАРИЙНЫХ РАЗРУШЕНИЙ ГАЗОПРОВОДА, ФУНКЦИОНИРУЮЩЕГО В МЕРЗЛЫХ ГРУНТАХ.....	186
Захаров В. Е.	
ЗАДАЧИ СТРАТЕГИЧЕСКОГО ПЛАНИРОВАНИЯ РАЗВИТИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ РЕГИОНА СЕВЕРА: НА ПРИМЕРЕ РЕСПУБЛИКИ САХА (ЯКУТИЯ).....	187
Лонгинова В. Я., Григорьев Ю. М.	
ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКАЯ КОМПОНЕНТА ГРОЗОВЫХ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ В ЛЭП В УСЛОВИЯХ МНОГОЛЕТНЕЙ МЕРЗЛОТЫ	189

Прохоров Д. В.

РАССЕЙННОЕ СОЛНЕЧНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ, ПОСТУПАЮЩЕЕ НА ГОРИЗОНТАЛЬНУЮ ПОВЕРХНОСТЬ:
ЭМПИРИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ И МЕТОДЫ ОЦЕНКИ 191

Унжаков А. С.

ПРОБЛЕМНЫЕ ВОПРОСЫ И НЕОБХОДИМОСТЬ ИЗМЕНЕНИЙ В АРХИТЕКТУРЕ ГОРЯЧЕГО
ВОДОСНАБЖЕНИЯ МНОГОКВАРТИРНЫХ ДОМОВ 192

ЧАСТЬ II

Математическое моделирование. Модели и численные методы решения задач теплообмена и гидрогазодинамики

Муратов М. В., Конов Д. С., Петров И. Б.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ УПРУГИХ И ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ИСКУССТВЕННЫХ
ЛЕДОВЫХ ОСТРОВАХ 194

Кожанов А. И., Пинигина Н. Р.

О ВЛИЯНИИ МЛАДШИХ КОЭФФИЦИЕНТОВ НА КОРРЕКТНОСТЬ
КРАЕВЫХ ЗАДАЧ ДЛЯ КВАЗИГИПЕРБОЛИЧЕСКИХ УРАВНЕНИЙ 197

Кожанов А. И.

ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЕ УРАВНЕНИЯ ВЫСОКОГО ПОРЯДКА
СО СЛАБЫМ ВЫРОЖДЕНИЕМ 198

Кожанов А. И., Лукина Г. А.

НЕКЛАССИЧЕСКИЕ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЕ УРАВНЕНИЯ
В НЕЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБЛАСТЯХ 198

Ермаков Б. С., Шапошников Н. О., Альхименко А. А., Лупуляк С. В., Голубев И. А.,

Слепцов О. И.

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ ТРУБОПРОВОДОВ,
ПРОКЛАДЫВАЕМЫХ В УСЛОВИЯХ ВЕЧНОЙ МЕРЗЛОТЫ, С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МАТЕМАТИЧЕСКОГО
МОДЕЛИРОВАНИЯ 199

Мусакаев Н. Г., Бородин С. Л., Огай В. А., Юшков А. Ю.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОСХОДЯЩЕГО ГАЗОЖИДКОСТНОГО ПОТОКА
С ПЕНООБРАЗУЮЩИМИ ПОВЕРХНОСТНО-АКТИВНЫМИ ВЕЩЕСТВАМИ
В ВЕРТИКАЛЬНОМ КАНАЛЕ 200

Абдрахманов А. М., Абдрахманова Р. П.

ВИДОИЗМЕНЕННАЯ ЗАДАЧА ДИРИХЛЕ ДЛЯ ВЫРОЖДАЮЩЕГОСЯ
МНОГОМЕРНОГО АНАЛОГА СИСТЕМЫ БИЦАДЗЕ 201

Аммосов Д. А., Васильева М. В., Васильев В. И., Тырылгин А. А.

ОБОБЩЕННЫЙ МНОГОМАСШТАБНЫЙ МЕТОД КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ
ДЛЯ ЗАДАЧИ ТЕРМОУПРУГОСТИ С ФАЗОВЫМ ПЕРЕХОДОМ 202

Аммосова О. А., Старостин Н. П.

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОВОГО ПРОЦЕССА ЭЛЕКТРОМУФТОВОЙ СВАРКИ
ПОЛИЭТИЛЕНОВЫХ ТРУБ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ ВОЗДУХА 204

Артюшин А. Н.

УРАВНЕНИЯ С ДРОБНОЙ ПРОИЗВОДНОЙ И МЕНЯЮЩИМСЯ «НАПРАВЛЕНИЕМ ВРЕМЕНИ» 205

Баранчук В. А., Пятков С. Г.

О НЕКОТОРЫХ КЛАССАХ ОБРАТНЫХ ЗАДАЧ С ТОЧЕЧНЫМ ПЕРЕОПРЕДЕЛЕНИЕМ
ДЛЯ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА 206

Белоногов В. А.

РАЗРЕШИМОСТЬ ЗАДАЧ СОПРЯЖЕНИЯ ТИПА НЕИДЕАЛЬНОГО КОНТАКТА
В ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ОБЛАСТИ 207

Болдырева О. Ю., Губайдуллин А. А., Дудко Д. Н.

ОСОБЕННОСТИ ЛИНЕЙНЫХ ВОЛН В ПОРИСТЫХ СРЕДАХ
С ГАЗОВЫМИ ГИДРАТАМИ 209

Борисова Н. Н., Рожин И. И.

ВЕРИФИКАЦИЯ МЕТОДА ОПРЕДЕЛЕНИЯ МАССОВОГО РАСХОДА ПО ЗАМЕРАМ ДАВЛЕНИЯ
НА УСТЬЕ СКВАЖИНЫ ПРИ ОБРАЗОВАНИИ ГИДРАТОВ ПРИРОДНОГО ГАЗА 210

Вабищевич П. Н.

НОВЫЕ СХЕМЫ РАСЩЕПЛЕНИЯ ДЛЯ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ЗАДАЧ 211

Васильев В. И., Аммосов А. В.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ
ИНЖЕНЕРНЫХ СООРУЖЕНИЙ С КРИОЛИТОЗОНОЙ 213

Васильева З. А. ОСОБЕННОСТИ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА В СКВАЖИНАХ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ.....	213
Панов А. В. ОБ ОДНОМЕРНОМ СТАЦИОНАРНОМ ДВИЖЕНИИ НЕИЗОТЕРМИЧЕСКОЙ ДВУХФАЗНОЙ СРЕДЫ.....	215
Васильева М. А., Старостин Н. П. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВОГО ПРОЦЕССА СВАРКИ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ С УЧЕТОМ ЭВОЛЮЦИИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ СТЕПЕНИ КРИСТАЛЛИЧНОСТИ.....	215
Вирц Р. А., Токарева М. А., Шишмарев К. А. ФИЛЬТРАЦИЯ ВЯЗКОЙ ЖИДКОСТИ В НЕИЗОТЕРМИЧЕСКОЙ ВЯЗКОУПРУГОЙ ПОРИСТОЙ СРЕДЕ.....	217
Вирц Р. А. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ФИЛЬТРАЦИИ ЖИДКОСТИ В ВЯЗКОУПРУГОЙ ПОРИСТОЙ СРЕДЕ.....	218
Голых Р. Н. ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МОЩНОГО УЛЬТРАЗВУКА НА СТРОЕНИЕ ВЫСОКОМОЛЕКУЛЯРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ПРИ ПОНИЖЕННЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ	219
Юлмухаметов А. А., Шакирьянов М. М. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВНЕШНЕЙ И ВНУТРЕННЕЙ ПРИСОЕДИНЕННОЙ МАССЫ ТРУБОПРОВОДА.....	221
Кузнецов И. В., Саженов С. А. О НЕМГНОВЕННЫХ ИМПУЛЬСНЫХ УРАВНЕНИЯХ АДВЕКЦИИ-ДИФфуЗИИ-РЕАКЦИИ В ГЛАЦИОЛОГИИ.....	223
Григорьев Ю. М., Яковлев А. М. КВАТЕРНИОННЫЙ АНАЛИЗ КАК МЕТОД МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ТРЕХМЕРНЫХ ЗАДАЧ	224
Кулагина Л. В. ИЗОТЕРМИЧЕСКИЕ ТЕЧЕНИЯ ПУЗЫРЬКОВОЙ СМЕСИ В КАВИТАЦИОННОМ АЭРАТОРЕ	226
Кулагина Т. А., Иванов С. А. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОДЕРЖАНИЯ РАДИОАКТИВНЫХ АЭРОЗОЛЕЙ В ВОЗДУХЕ.....	228
Сибин А. Н., Папин А. А. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОСХОДЯЩЕГО ФИЛЬТРАЦИОННОГО ПОТОКА СМЕСИ ВОДЫ И ТВЕРДЫХ ЧАСТИЦ С УЧЕТОМ ПРОЦЕССОВ ВНУТРЕННЕЙ СУФФОЗИИ	231
Джамалов С. З., Ашуров Р. Р., Туракулов Х. Ш. ОБ ОДНОЙ ПОЛУНЕЛОКАЛЬНОЙ КРАЕВОЙ ЗАДАЧЕ ДЛЯ ТРЕХМЕРНОГО УРАВНЕНИЯ ЧАПЛЫГИНА В ПРИЗМАТИЧЕСКОЙ НЕОГРАНИЧЕННОЙ ОБЛАСТИ	233
Кулагин В. А., Соколов Н. Ю. СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СИСТЕМ ТЕПЛОВЫХ ТРУБ ДЛЯ ОХЛАЖДЕНИЯ ЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ.....	235
Кулагин В. А., Пьяных Т. А. ГИДРОДИНАМИКА СУПЕРКАВИТАЦИОННОГО ИСПАРИТЕЛЯ С УЧЕТОМ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ ЭФФЕКТОВ.....	237
Рузиев М. Х. НЕЛОКАЛЬНАЯ КРАЕВАЯ ЗАДАЧА ДЛЯ УРАВНЕНИЯ СМЕШАННОГО ТИПА.....	239
Орлова Д. С., Пятков С. Г. О НЕКОТОРЫХ ОБРАТНЫХ ЗАДАЧАХ ДЛЯ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ БЛЭКА-ШОУЛЗА.....	241
Пятков С. Г. ОБ ОБРАТНЫХ ЗАДАЧАХ ОБ ОПРЕДЕЛЕНИИ ФУНКЦИИ ИСТОЧНИКА С ТОЧЕЧНЫМ ПЕРЕОПРЕДЕЛЕНИЕМ.....	243
Токарева М. А., Папин А. А., Береговых А. А. ДВУХФАЗНАЯ ФИЛЬТРАЦИЯ В ТОНКОМ ПОРОУПРУГОМ СНЕЖНОМ СЛОЕ	244
Солдатов А. П. КРАЕВАЯ ЗАДАЧА С НОРМАЛЬНЫМИ ПРОИЗВОДНЫМИ ДЛЯ ЭЛЛИПТИЧЕСКОГО УРАВНЕНИЯ НА ПЛОСКОСТИ.....	245
Пятков С. Г., Неустроева Л. В. О НЕКОТОРЫХ АСИМПТОТИЧЕСКИХ ПРЕДСТАВЛЕНИЯХ И ИХ ПРИЛОЖЕНИЯХ	246
Дзарахохов А. В., Шишкина Э. Л. О СУЩЕСТВОВАНИИ И ЕДИНСТВЕННОСТИ РЕШЕНИЯ ОДНОГО ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО УРАВНЕНИЯ СМЕШАННОГО ТИПА.....	247

Шадрина Н. Н.	
О НЕКОТОРОЙ КРАЕВОЙ ЗАДАЧЕ С УСЛОВИЯМИ СОПРЯЖЕНИЯ ДЛЯ КВАЗИПАРАБОЛИЧЕСКИХ УРАВНЕНИЙ ТРЕТЬЕГО ПОРЯДКА С РАЗРЫВНЫМ ЗНАКОПЕРЕМЕННЫМ КОЭФФИЦИЕНТОМ	249
Денисов А. М.	
ПРОБЛЕМЫ ИДЕНТИФИКАЦИИ НЕИЗВЕСТНОГО ИСТОЧНИКА В УРАВНЕНИИ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ...	250
Саввинова Н. А., Слепцов С. Д., Гришин М. А.	
ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАДИАЦИОННО-КОНДУКТИВНОГО ТЕПЛООБМЕНА В ПЛОСКОМ СЛОЕ ЛЬДА ПРИ РАДИАЦИОННОМ НАГРЕВЕ	250
Гусев Е. Л.	
РАЗРАБОТКА И ПРИМЕНЕНИЕ ОБОБЩЕННЫХ МОДЕЛЕЙ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ОПРЕДЕЛЯЮЩИХ ХАРАКТЕРИСТИК КОМПОЗИТОВ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ ФАКТОРОВ ВНЕШНЕЙ СРЕДЫ, ХАРАКТЕРНЫХ ДЛЯ УСЛОВИЙ КРАЙНЕГО СЕВЕРА, АРКТИЧЕСКОЙ И СУБАРКТИЧЕСКОЙ ЗОНЫ.....	252
Гусев Е. Л., Бакулин В. Н.	
УЧЕТ ОШИБОК ИЗМЕРЕНИЙ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ ДОЛГОВРЕМЕННОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПРИ ПРИМЕНЕНИИ МОДЕЛЕЙ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ОПТИМАЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ И СЛОЖНОСТИ В ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ ВНЕШНЕЙ СРЕДЫ	254
Гусев Е. Л., Черных В. Д.	
РАЗРАБОТКА И ПРИМЕНЕНИЕ КОМБИНИРОВАННЫХ МЕТОДОВ ОПТИМИЗАЦИИ В УТОЧНЕННЫХ ВАРИАЦИОННЫХ ПОСТАНОВКАХ ЗАДАЧ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА КОМПОЗИТОВ	256
Шадрин В. Ю., Семенов М. Ф., Иванов Г. И., Матвеева О. И.	
КОЭФФИЦИЕНТ ОБЛУЧЕННОСТИ И МЕТОД ЕДИНИЧНОЙ СФЕРЫ	259
Ноговицын П. И., Григорьев Ю. М.	
МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ СИГНАЛОВ ПО МНОГОПРОВОДНЫМ ЛИНИЯМ ПЕРЕДАЧ	259
Григорьева А. И.	
КРАЕВЫЕ ЗАДАЧИ ДЛЯ УРАВНЕНИЙ СОСТАВНОГО ТИПА С РАЗРЫВНЫМИ КОЭФФИЦИЕНТАМИ	261
Егорова Г. Н., Мордовской С. Д.	
МОДЕЛИРОВАНИЕ МОРОЗНОГО ПУЧЕНИЯ В СЛОЕ СЕЗОННОГО ОТАИВАНИЯ ГРУНТОВ.....	261
Петров В. Н., Лепов В. В.	
ФИЗИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РОСТА ХРУПКОЙ ТРЕЩИНЫ ПРИ ДИНАМИЧЕСКОМ ВОЗДЕЙСТВИИ НА СТАТИЧЕСКИ НАГРУЖЕННЫЙ ОБРАЗЕЦ С НАДРЕЗОМ	263
Ерофеевская Л. А.	
ПОСТРОЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ЭКСПОНЕНЦИАЛЬНОГО РОСТА КЛЕТОК КРИОФИЛЬНЫХ МИКРООРГАНИЗМОВ В УСЛОВИЯХ ПЕРИОДИЧЕСКОГО КУЛЬТИВИРОВАНИЯ	265
Мордовской С. Д., Васильева Н. В., Акимов М. П., Эверстов В. В.	
ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ЛЬДООБРАЗОВАНИЯ В ВОДОЕМАХ.....	267
Федоров В. Е., Ядрихинский Х. В.	
ГРУППОВАЯ КЛАССИФИКАЦИЯ И ИНВАРИАНТНЫЕ РЕШЕНИЯ СИСТЕМЫ УРАВНЕНИЙ ДИНАМИКИ НЕИЗОТЕРМИЧЕСКОЙ ДВУХФАЗНОЙ СРЕДЫ	268
Иванов В. А., Рожин И. И.	
ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОТАИВАНИЯ ВЕРХНЕГО СЛОЯ МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ПОРОД В РАЙОНЕ ГОРОДА ЯКУТСКА ПРИ ОТЕПЛЕНИИ КЛИМАТА ДО 2100 ГОДА.....	268
Семёнова М. Н., Корзникова Е. А.	
МНОГОКОМПОНЕНТНЫЕ ДЕЛОКАЛИЗОВАННЫЕ НЕЛИНЕЙНЫЕ КОЛЕБАТЕЛЬНЫЕ МОДЫ В ГРАФЕНЕ.....	270
Лазарев Н. П.	
ЗАДАЧА О РАВНОВЕСИИ ТЕРМОУПРУГОЙ ПЛАСТИНЫ КИРХГОФА-ЛЯВА С НАКЛОННОЙ ТРЕЩИНОЙ	272
Павлов С. С.	
ОБРАТНЫЕ КОЭФФИЦИЕНТНЫЕ ЗАДАЧИ ДЛЯ КВАЗИГИПЕРБОЛИЧЕСКИХ И БЛИЗКИХ К НИМ УРАВНЕНИЙ.....	272
Павлов Н. Н., Пирожков А. Р.	
КЛАССИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ПОИСКА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ СТАЦИОНАРНОГО ТЕЧЕНИЯ ГАЗА В ТРУБАХ	273
Семёнов А. С., Якушев И. А.	
МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ДВУМЕРНЫХ И ТРЕХМЕРНЫХ КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ СТРУКТУРАХ	274

Тарасова Г. И.	
О РАЗРЕШИМОСТИ НЕЛОКАЛЬНЫХ КРАЕВЫХ ЗАДАЧ ДЛЯ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО УРАВНЕНИЯ СОСТАВНОГО ТИПА	276
Пермяков П. П., Попов Г. Г.	
МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЛАГОПЕРЕНОСА В ГЕОКРИОЛОГИИ	276
Попов В. И.	
МЕТОД РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ КРИОГЕННОГО ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА В ГОРНЫХ ПОРОДАХ В ПРИЛОЖЕНИИ К РАСПРЕДЕЛЕНИЮ И УСЛОВИЯМ ФОРМИРОВАНИЯ ЛЬДИСТОСТИ В ПРОМЕРЗАЮЩИХ ОСАДОЧНЫХ ПОРОДАХ.....	279
Попов В. В.	
ЧИСЛЕННАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ИЗВЛЕЧЕНИЯ ГАЗА ИЗ ГАЗОГИДРАТНОЙ ЗАЛЕЖИ ПОНИЖЕНИЕМ ДАВЛЕНИЯ.....	280
Попов Н. С.	
О НЕЛОКАЛЬНЫХ ИНТЕГРО-ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ ЗАДАЧАХ МНОГОМЕРНЫХ ДИФFUЗИОННЫХ ПРОЦЕССОВ.....	281
Тихонов Р. С., Старостин Н. П.	
МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВОГО ПРОЦЕССА В ПОЛИМЕРНОМ ПОДШИПНИКЕ СКОЛЬЖЕНИЯ С ВОЗВРАТНО-ВРАЩАТЕЛЬНЫМ ДВИЖЕНИЕМ ВАЛА	282
Слепцов О. И., Слепцов Г. Н.	
РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ РАСЧЕТА ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ СВАРКЕ С ПОДОГРЕВОМ СТАЛЬНЫХ ЛИСТОВ	284
Тимофеев А. М.	
ВЛИЯНИЕ РАССЕЯНИЯ НА РАДИАЦИОННО-КОНДУКТИВНЫЙ ТЕПЛООБМЕН В ДВУХСЛОЙНОЙ ПОЛУПРОЗРАЧНОЙ СИСТЕМЕ	285
Алексеева Э. Б., Тимофеев А. М.	
ТЕПЛОПЕРЕДАЧА ЧЕРЕЗ ОГРАЖДАЮЩУЮ ПЛОСКУЮ КОНСТРУКЦИЮ С УЧЕТОМ ПАРНИКОВОГО ЭФФЕКТА.....	287
Попова М. Н.	
КРАЕВЫЕ ЗАДАЧИ ЖЕВРЕ ДЛЯ ПАРАБОЛИЧЕСКИХ УРАВНЕНИЙ	288
Попов С. В.	
ГЛАДКИЕ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ЖЕВРЕ ДЛЯ УРАВНЕНИЯ СМЕШАННОГО ТИПА	289
Степанов В. Е., Степанова К. В.	
ОЦЕНКА КРАЕВЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ДЛЯ СТОЙКИ РЫХЛИТЕЛЯ КОПИСТОЙ ФОРМЫ БУЛЬДОЗЕРА.....	290
Тимофеева Т. С., Винокурова С. С.	
ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЙ МОДЕЛИ ПОПУЛЯЦИИ МИКРООРГАНИЗМОВ С НЕЛОКАЛЬНЫМ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕМ	291
Федоров А. Г., Федорова Л. К., Сыромятникова А. С.	
ЧИСЛЕННАЯ ОЦЕНКА ПРОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРЕСНОГО ЛЬДА, АРМИРОВАННОГО БАЗАЛЬТОВЫМИ НАПОЛНИТЕЛЯМИ	291
Худаев Д. Д., Федотова М. А.	
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ФРЕЙМВОРКА FLUTTER ДЛЯ СОЗДАНИЯ ПРОЕКТА ЭКОДВИЖЕНИЯ	293
Шарин Е. П., Муксунов Н. Я.	
ЭЛЕКТРОННЫЕ СВОЙСТВА СТРУКТУРЫ ГРАФЕН-СИЛИЦЕН	295
Мусакаев Н. Г., Бородин С. Л., Косяков В. П.	
МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОБРАЗОВАНИЯ ГАЗОГИДРАТА В ЗОНАЛЬНО-НЕОДНОРОДНОМ ПОРИСТОМ ПЛАСТЕ	296
Авторы	298

Часть I

Теплофизика и теплотехника

Термомеханика и тепломассообмен в многофазных средах. Методы и средства измерений, приборы и автоматизированные системы для изучения теплофизических свойств веществ. Строительная теплофизика.

ТЕПЛООБМЕН ПРИ ПЛЕНОЧНОМ ОХЛАЖДЕНИИ ПАКЕТА ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ ТРУБ С РАЗВИТОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ

Печеркин Н. И.¹, Павленко А. Н.¹, Володин О. А.¹, Катаев А. И.¹, Миронова И. Б.¹,
Дас М. К.²

¹ Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, г. Новосибирск, Россия

² Индийский Институт технологий, г. Бхубанешвар, Индия

Аннотация. В докладе приведены результаты исследования различных методов обработки поверхности с целью интенсификации теплообмена в стекающих пленках на пакете горизонтальных труб. Эксперименты проводились на трубках из алюминиевого сплава с керамическим покрытием, полученным методом микродугового оксидирования и на медных трубках со структурированной поверхностью, полученной методом деформирующего резания. Проведено сравнение результатов измерения коэффициентов теплопередачи на поверхности образцов с развитой поверхностью и на эталонных гладких трубках без обработки.

HEAT TRANSFER AT FILM COOLING OF AN ARRAY OF HORIZONTAL TUBES WITH ENHANCED SURFACE

Pecherkin N.I.¹, Pavlenko A.N.¹, Volodin O.A.¹, Kataev A.I.¹, Mironova I.B.¹, Das M.K.²

¹ Kutateladze institute of Thermophysics, Siberian Branch of RAS, Novosibirsk, Russia.

² School of Mechanical Sciences, Indian Institute of Technology Bhubaneswar, India.

Abstract. The report presents the results of an experimental study of various methods of surface modification for the intensification of heat transfer in the falling films on an array of horizontal tubes. The experiments were carried out on aluminum alloy tubes with a ceramic coating obtained by microarc oxidation and on copper tubes with a structured surface obtained by deformational cutting. The results of measuring the heat transfer coefficients on the surface of samples with an enhanced surface and reference plain tubes without treatment are compared.

Работа посвящена изучению интенсификации теплообмена в пленочных теплообменниках с пучками труб с модифицированной поверхностью, которые широко используются в кожухотрубных теплообменниках, в том числе и для ожижения природного газа. Применение методов интенсификации процессов тепломассопереноса может привести к снижению габаритов и массы теплообменников и соответствующих эксплуатационных затрат за счет повышения эффективности аппаратов по сравнению с выпускаемыми моделями. Рассматриваются различные способы модифицирования поверхности для интенсификации теплообмена при пленочном орошении наружной поверхности горизонтальных труб: метод деформирующего резания (МДР) [1] и технология микродугового оксидирования (МДО) [2].

Эксперименты проводятся на установке, представляющей собой замкнутый циркуляционный контур [3]. В испарителе стенда расположен вертикальный пакет гори-

горизонтальных труб с наружным диаметром 10 мм, установленных с зазором 2 мм. Орошаемая длина труб в испарителе – 625 мм. Орошение пакета происходит на полной длине труб через щелевой распределитель. Число Рейнольдса стекающей пленки варьируется в диапазоне от 400 до 1500. В качестве рабочей жидкости используется фреон R21, давление в испарителе – 3 бар, температура насыщения $\approx 40^\circ\text{C}$. Тепловой поток создается за счет пропускания внутри труб горячей воды. Количество подведенного тепла к каждой измерительной трубе рассчитывается по заданному расходу и измеренной разности температур теплоносителя на входе и выходе.

Пример фрагмента видеосъемки течения пленки на пакете горизонтальных труб из алюминиевых сплавов АД31 и Д16Т с МДО-покрытиями, полученными в кислотном, щелочном, фосфатном электролитах при различных режимах обработки, показан на Рис. 1(а). Аналогичные данные по визуализации течения получены на пакете труб с поверхностями, созданными методом деформирующего резания. При больших расходах жидкости наблюдается течение пленки с регулярно расположенными по длине труб кольцевыми валиками или струями с кипящей жидкостью. Расстояние между валиками колеблется в пределах 1.5–2 диаметров трубы. Интенсивность процесса парообразования в пленке зависит не только от величины теплового потока, но и от типа покрытия.

Коэффициенты теплоотдачи со стороны стекающей пленки рассчитаны через коэффициенты теплопередачи K с учетом термического сопротивления стенок труб и их покрытий. Общий коэффициент теплопередачи рассчитывался по формуле $K=Q/F(\Delta T)$, где Q – количество тепла, подводимое к рабочему участку, $F = \pi dL$ – площадь теплоотдающей поверхности, (ΔT) – среднелогарифмическая разность температур теплоносителя и температуры насыщения хладагента R21.

Результаты измерения коэффициентов теплоотдачи в стекающей пленке хладагента R21 показаны на Рис. 1(б). Приведены данные по зависимости средних по длине коэффициентов теплоотдачи от теплового потока для рабочих участков с различной структурой поверхности. Микроструктура поверхности рабочего участка № 2 с полужакрытыми полостями нанесена методом деформирующего резания и имеет следующие параметры: шаг оребрения – 100 мкм, высота ребер – 220 мкм, шаг накатки – 318 мкм [3]. Данная структура показывает наибольшую интенсификацию теплообмена в режиме пузырькового кипения. Покрытие № 3 толщиной 30 мкм получено методом МДО в щелочном электролите с добавкой жидкого стекла [4]. Интенсификация теплообмена в режиме пузырькового кипения на этой поверхности сравнима с результатами, полученными на поверхности с микроструктурой [3].

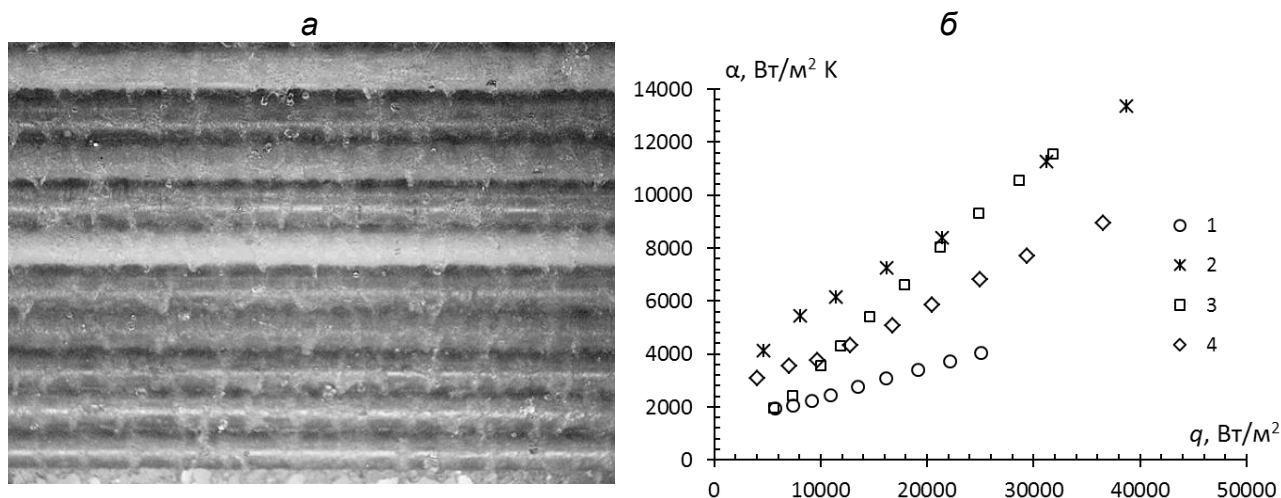


Рис. 1. Течение пленки (а) и теплообмен (б) на пакете горизонтальных труб: 1 – труба без покрытия; 2 – медная труба с микроструктурой МДР; 3 – труба из сплава Д16Т с МДО-покрытием; 4 – медная труба с ромбовидной структурой. $Re = 1000$, $q \approx 3 \times 10^4 \text{ Вт/м}^2$

Структура поверхности № 4 также нанесена методом ДР. Она имеет ромбовидную форму с углом наклона рифлений 10° и 30° и с шагами рифлений 0.8 и 1.2 мм. Эта

структура наиболее эффективна в режиме испарения благодаря более равномерному распределению стекающей пленки жидкости по поверхности трубы. Для сравнения на Рис. 1(б) приведены данные по коэффициентам теплоотдачи на трубе из алюминиевого сплава Д16Т с гладкой поверхностью (№ 1).

Полученные результаты показывают, что метод деформирующего резания позволяет создавать развитые поверхности для значительной интенсификации теплообмена в стекающей пленке в режиме пузырькового кипения за счет уменьшения температурного напора начала закипания и обеспечения стабильной работы центров парообразования. Технология микродугового оксидирования (МДО) позволяет создавать воспроизводимые по характеристикам, обладающие высокой механической прочностью пористые оксидные покрытия на протяженных поверхностях, что может быть весьма перспективным для производства крупномасштабных спирально-витых теплообменников [5].

Исследование выполнено при поддержке гранта РФФИ и ДНТ (проект № 19-58-45029_инд, исследования микроструктур МДР) и гранта Правительства РФ для поддержки научных исследований, проводимых под руководством ведущих ученых № 075-15-2019-1888 (исследования МДО-покрытий).

Литература

1. Volodin O., Pecherkin N., Pavlenko A., Zubkov N. Surface microstructures for boiling and evaporation enhancement in falling films of low-viscosity fluids // Int. J. Heat and Mass Transfer. – 2020. – Vol. 155. – P. 119722.
2. Суминов И.В., Эпельфельд А. В., Людин В.Б., Крит Б.Л., Борисов А. М. Микродуговое оксидирование (теория, технология, оборудование) / И.В. Суминов и др. – М.: ЭКОМЕТ, 2005. – 368 с.
3. Volodin O.A., Pecherkin N.I., Pavlenko A.N., Zubkov N.N., Kataev A.I., Mironova I.B., M.K. Das Intensification of heat transfer in falling films on a bundle of horizontal tubes with microstructured surface // Journal of Physics: Conference Series. – 2020. – Vol. 1677. – P. 012099.
4. Pavlenko A.N., Pecherkin N.I., Volodin O.A., Kataev A.I., Mironova I.B. Heat transfer in the falling liquid film on an array of horizontal tubes with MAO coating // Journal of Physics: Conference Series. – 2020. – Vol. 1677. – P. 012091.
5. LNGas.ru: <https://lngas.ru/lng-equipment/teploobmenniki-plastinchatye-navitye.html>.

ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНО-РАЗНОСТНАЯ МОДЕЛЬ ТЕПЛОПЕРЕНОСА В НЕСТАЦИОНАРНОЙ ТЕПЛОМЕТРИИ

Пилипенко Н. В.¹, Заричняк Ю. П.¹, Иванов В. А.², Колодийчук П. А.¹

¹ Национальный Исследовательский Университет Информационных технологий, механики и оптики, Санкт-Петербург, Россия

² Институт физико-технических проблем севера им. В. П. Ларионова СО РАН
Якутск, Россия

Аннотация. В работе рассматриваются параметрические и комбинированные обратные задачи теплопроводности, при решении которых проводится анализ дифференциально-разностных моделей теплопереноса, которые учитывают различный характер внешнего воздействия и процессы, происходящие в системах тел, включая и фазовые переходы.

Abstract. The paper considers parametric and combined inverse heat conduction problems. Solving which, the analysis of differential-difference models of heat transfer is carried out. The models take into account the different nature of the external effects and the processes occurring inside the systems of bodies, including phase transitions.

При восстановлении граничных условий теплообмена, определения нестационарных тепловых потоков, а также теплофизических характеристик материалов сложных систем тел разрабатываются различные модели теплопереноса.

В работе рассматриваются параметрические и комбинированные обратные задачи теплопроводности, при решении которых составляются дифференциально-разностные модели теплопереноса, которые учитывают различный характер внешнего воздействия и процессы, происходящие в системах тел, включая и фазовые переходы.

Рассмотрен способ получения динамических характеристик используемых преобразователей нестационарного теплового потока, установления доверительной области при восстановлении параметров теплообмена, неопределенности полученных результатов. Отличительной способностью рассматриваемого метода решения задач является общий подход к составлению дифференциально-разностной модели теплопереноса для различных систем тел и используемых при этом различных преобразователей нестационарного теплового потока.

Литература

1. Пилипенко Н.В., Заричняк Ю.П., Иванов В.А., Халявин А. М. Параметрическая идентификация дифференциально-разностных моделей теплопереноса в одномерных телах на основе алгоритмов фильтра Калмана // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2020. Т. 20. № 4. С. 584–588.
2. Пилипенко Н.В. Использование расширенного фильтра Калмана в нестационарной теплотометрии при решении обратных задач теплопроводности // Известия высших учебных заведений. Приборостроение – 2019 – Т. 62. – № 3. – С. 212-217.

GOING BEYOND CONVENTIONAL HEAT PIPES: NEW DEVELOPMENTS IN PASSIVE THERMAL MANAGEMENT SYSTEMS

Sameer Khandekar
Indian Institute of Technology Kanpur
Kanpur, India

Abstract. The term ‘Heat Pipe’ is a rather interesting way to describe a ‘synergistic engineering structure which is equivalent to a material having a thermal conductivity greatly exceeding to that of any known material (Grover, 1966) – for all practical purposes, what it means is that a heat pipe is a thermal super-conductor, as shown in Figure 1 (a)-(c). The last fifty years have seen phenomenal technological growth and market penetration of heat pipe systems. However, recent trends have also necessitated to go beyond conventional designs and explore newer and more efficient systems.

One of the reasons for inferior performance of conventional heat pipes is the fact that the wick structure is present throughout its length and this presents a substantial pressure drop for liquid return flow. Furthermore, due to the counter-current flow of the liquid and the vapor phase, interfacial interaction also adds to the total pressure penalty. In order to overcome these limitations, Loop Heat Pipes (LHPs) were invented in early 1980s (Gerasimov et al., 1974, 1975; Maydanik, 2005, as shown in Figure 2(a). In contrast to a conventional heat pipe, the main driving capillary wick structure is present only in the evaporator section. All other components (condenser, liquid return line and vapor feeder line to the condenser) are made from simple smooth tubing/piping. Hence, net liquid-return pressure drop reduces drastically in comparison to the conventional heat pipes, and the additional viscous interaction between liquid and vapor phases is also absent in LHPs, as both phases move in independent tube sections. With these features and the possibility of using enhanced porous evaporator wicks, LHPs are proving to be substantially better in terms of thermal performance than conventional wicked heat pipes.

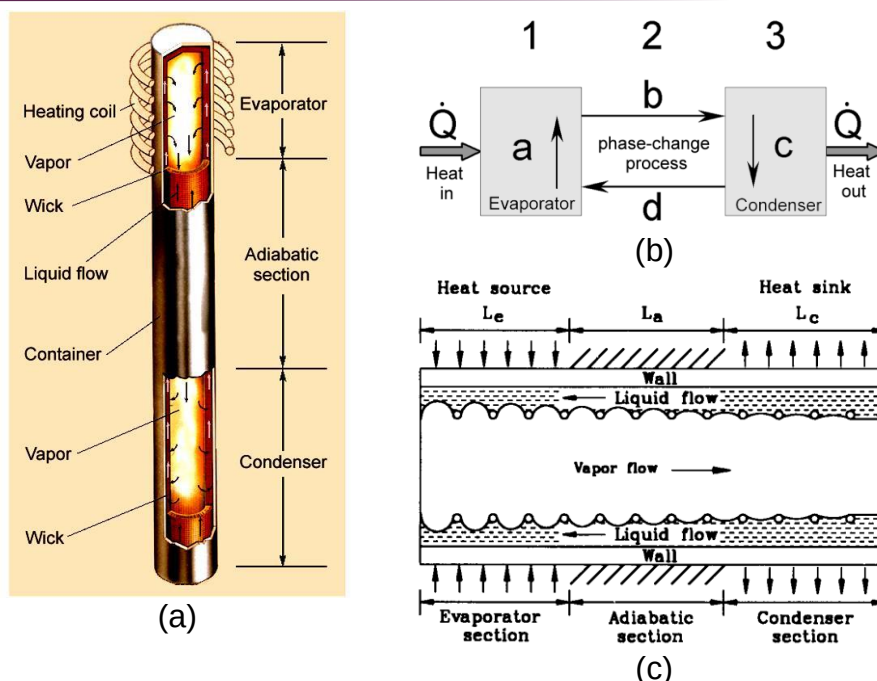


Figure 1. (a) Typical design features of a Conventional Heat Pipe (b) Heat and mass transfer processes in a conventional heat pipe (c) Cut section of a heat pipe schematically showing the internal working principle.

A pulsating heat pipe (PHP), introduced by Akachi (1990; 1996), consists of a plain meandering tube of capillary dimensions with many U-turns as shown in Figure 2(b). A PHP is a complex heat transfer device with a strong thermo-hydraulic coupling governing its performance. It is essentially a non-equilibrium heat transfer device. The successful performance of the device is primarily due to the continuous maintenance or sustenance of these non-equilibrium conditions within the system. The liquid and vapor slug transport is because of the pressure pulsation caused in the system. Since these pressure pulsations are thermally driven, because of the inherent construction of the device, there is no external mechanical power source required for the fluid transport. In an actual working PHP, there exists a temperature gradient between the evaporator and the condenser section. Further, inherent perturbations are always present in real systems (Khandekar et al., 2003). The net effect of these temperature gradients within the system is to cause non equilibrium pressure condition which, as stated earlier, is the primary driving force for thermo-fluidic transport in a PHP. A sustained non-equilibrium state exists between the driving thermal potentials and the natural causality which tries to equalize the pressure in the system. Thus, a self-sustained thermally driven oscillating flow is obtained in a PHP.

In this paper we will summarize the history of conventional heat pipes, highlight their limitations, and delineate the newer developments which have taken place in the last twenty years. The nuances of the new systems, such as Loop and Pulsating Heat Pipes (including cryogenic heat pipes), which are fast becoming popular due to their inherent advantages will be described. The manuscript is structured to serve as a comprehensive review of passive thermal systems.

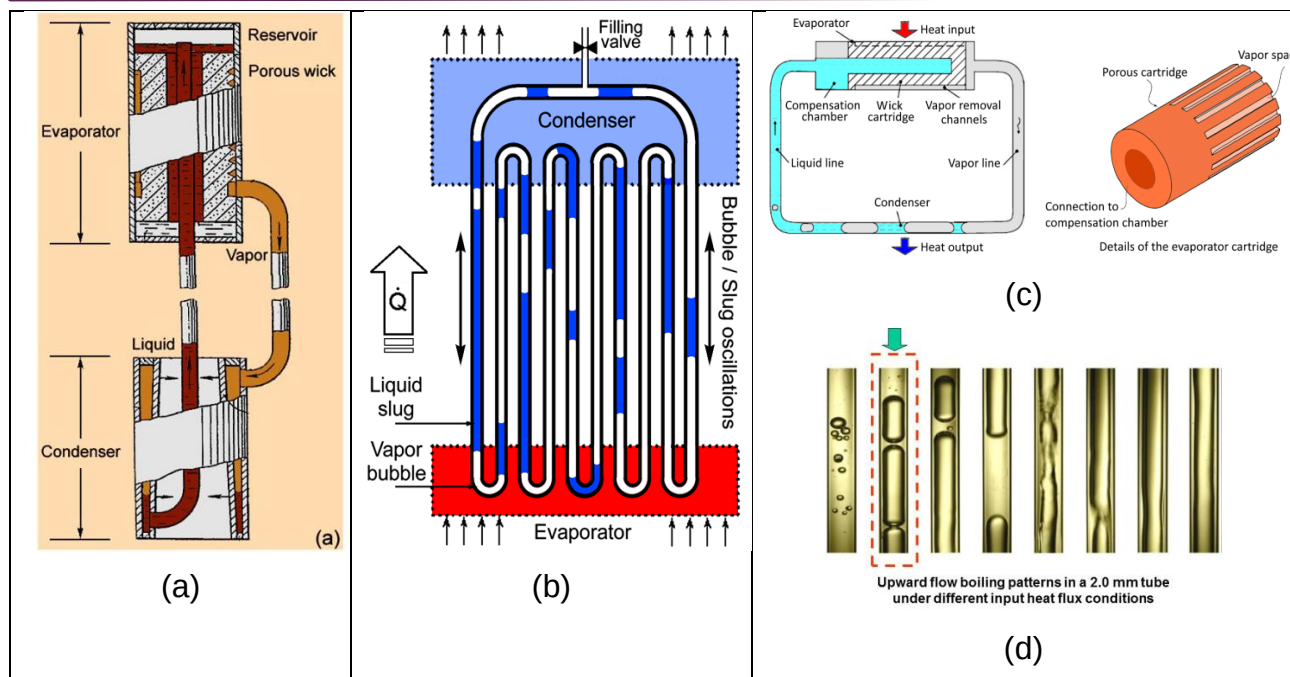


Figure 2. (a) Typical design features of a Loop Heat Pipe (b) Photograph of a miniature LHP developed by Prof. Yuri Maydanik RAS-Ural Branch (c) Internal features of a LHP with evaporator cartridge design.

References

1. Khandekar S., Heat Pipes, Chapter in: CRC Handbook of Thermal Engineering, 2nd edition, Ed.: Kreith F., and Chhabra R. P., ISBN 9781498715270 – CAT# K25334, CRC Press (Taylor and Francis), 2017.
2. Khandekar S. (Editor), Science and Technology of Heat Pipes, Historical Perspective to Contemporary Developments, Proceedings of the 17th International Heat Pipe Conference, October 2013, ISBN: 978-1-56700-452-6, Begell House, 2015.

РАСЧЕТ ТЕМПЕРАТУРЫ ТУРБУЛЕНТНЫХ И ЛАМИНАРНЫХ ПОТОКОВ НЕФТИ В СКВАЖИНЕ С ПОМОЩЬЮ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА

Родионов А. С.

Уфимский государственный нефтяной технический университет
г. Уфа, Россия

Аннотация. В статье рассматривается программный комплекс для моделирования температуры поток нефти в скважине при возможном возникновении турбулентного режима. Обоснована необходимость учета возможного перехода потока нефти в скважине к турбулентному режиму течения и радиального распределения температуры при моделировании температурного поля в скважине для интерпретации результатов температурных исследований. Показано, что смена режима течения может вызывать значительные перепады температуры вдали от стенок скважины, что может внести искажения в описанные выше исследования.

Abstract. The article considers a software package for modeling the temperature of the oil flow in a well in the event of a possible occurrence of a turbulent regime. The necessity of taking into account the possible transition of the oil flow in the well to the turbulent flow regime and the radial temperature distribution when modeling the temperature field in the well for the interpretation of the results of temperature studies is justified. It is shown that a change in the flow regime can cause significant temperature changes away from the well walls, which can distort the studies described above.

Одним из способов исследования скважин являются температурные измерения вдоль ствола скважины. Скважинная термометрия позволяет проводить диагностику нефтяных скважин на наличие интервалов заколонной циркуляции. Однако, наряду с обводнением, могут наблюдаться и другие эффекты, не являющиеся нежелательными, но при этом способные исказить результаты интерпретации скважинных термограмм. Одним из таких эффектов является произвольная турбулизация потока нефти при числах Рейнольдса, близких к критическому значению.

Отсутствие учета изменения режима течения может привести к возникновению заметных ошибок и, соответственно, привести к неправильным выводам. Также следует отметить, что распределение сильно зависит от радиальной координаты, что указывает на необходимость проведения исследований радиальных распределений температурных полей потока жидкости в скважине с целью совершенствования технологии скважинной термометрии.

В работах [1–3] развита теория, позволяющая получить численно-аналитическое решение основной задачи термокаротажа с учетом возможности спонтанного перехода потока нефти к турбулентному режиму от ламинарного и обратно.

Размерная постановка задачи в предположении осевой симметрии включает уравнения теплопроводности в окружающем трубу радиуса r_d массиве $r_d > r$ (1) и конвективной теплопроводности флюида с источниками в трубе $r_d < r_0$ (2), а также начальные и граничные условия

$$c_1 \rho_1 \frac{\partial \theta_1}{\partial \tau} - \lambda_{z1} \frac{\partial^2 \theta_1}{\partial z_d^2} - \lambda_{r1} \frac{1}{r_d} \frac{\partial}{\partial r_d} \left(r_d \frac{\partial \theta_1}{\partial r_d} \right) = 0, \quad \tau > 0, \quad (1)$$

$$c \rho \frac{\partial \theta}{\partial t} - \lambda_r \frac{1}{r_d} \frac{\partial}{\partial r_d} \left(r_d \lambda \left(\frac{r_d}{r_0} \right) \frac{\partial \theta}{\partial r_d} \right) - \lambda_z \frac{\partial^2 \theta}{\partial z_d^2} + c \rho \omega R \left(\frac{r_d}{r_0} \right) \frac{\partial \theta}{\partial z_d} = q_d, \quad \tau > 0. \quad (2)$$

$$\theta \Big|_{r_d=r_0} = \theta_1 \Big|_{r_d=r_0}, \quad \left(\lambda_r \lambda \left(\frac{r_d}{r_0} \right) \frac{\partial \theta}{\partial r_d} \right) \Big|_{r_d=r_0} = \lambda_{r1} \frac{\partial \theta_1}{\partial r_d} \Big|_{r_d=r_0}. \quad (3)$$

$$\theta \Big|_{\tau=0} = \theta_1 \Big|_{\tau=0} = \theta_{01} - \Gamma z_d, \quad \theta_1 \Big|_{r_d \rightarrow \infty} = \theta_{01} - \Gamma z_d. \quad (4)$$

$$\theta \Big|_{z_d=0} = \theta_{10}(\tau). \quad (5)$$

Индекс “1” соответствует параметрам окружающей среды, отсутствие индекса – параметрам в скважине. На границе скважины и окружающего массива заданы условия равенства температур (соответственно θ и θ_1) и тепловых потоков

На основе описанной математической модели был создан программный комплекс [4], позволяющий проводить моделирование температурных распределений в скважине с учетом турбулентного режима течения. На рисунке 1 показан пример работы демонстрационной версии программного модуля моделирования турбулентного потока нефти в скважине.

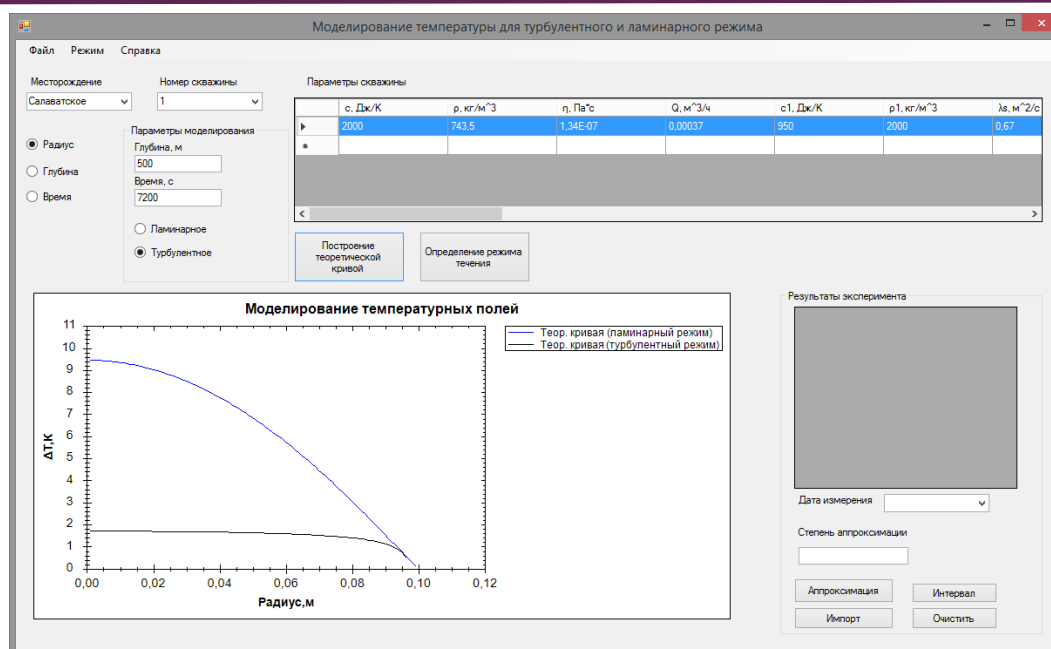


Рис. 1. Пример работы демонстрационной версии программного модуля моделирования турбулентного потока нефти в скважине

На рисунке представлено моделирование температуры потока нефти для турбулентного и ламинарного режима течения для одинаковых параметров скважины и потока нефти и при одинаковых дебитах $32 \text{ м}^3/\text{сут}$. Выбранные параметры создают условия для реализации неустойчивого турбулентного режима течения, то есть значения температуры могут испытывать колебания до 7 градусов вследствие произвольной смены режима течения – от ламинарного к турбулентному и наоборот. Отсутствие учета данного факта может внести ошибки в процесс интерпретации скважинных термограмм.

Таким образом, разработанный программный комплекс может повысить точность интерпретации скважинных термограмм. В основу работы комплекса положено решение основной задачи термокаротажа, полученное с помощью «в среднем точного» асимптотического метода.

Литература

1. Filippov A.I., Akhmetova O.V., Rodionov A.S. Quasi-one-dimensional nonstationary temperature field of a turbulent flow in a well // Journal of Engineering Thermophysics. 2012. Т. 21. № 3. С. 167-180.
2. Филиппов А.И., Ахметова О.В., Родионов А. С., Горюнова М. А. Исследование температурных полей в трубах переменного радиуса // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2010. Т. 6. № 10. С. 171-178.
3. Филиппов А.И., Ахметова О.В., Зеленова М. А., Родионов А. С. Задача термокаротажа с заданным радиальным профилем скорости нефтяного потока в стволе скважины // Инженерно-физический журнал. 2013. Т. 86. № 1. С. 172-190.
4. Родионов А. С., Фархутдинов Р. И., Хусаинов И.Р. Программный комплекс моделирования температурных полей в скважине // Информационные технологии. Проблемы и решения: Материалы Международной научно-практической конференции. – 2017. № 1 (4). – С. 27-30.

АНАЛИЗ ПОВЕДЕНИЯ НЕРАВНОМЕРНО НАГРЕТОЙ ПЛЕНКИ БИНАРНОГО ГОМОГЕННОГО РАСТВОРА

Бородина К. А.
Тюменский государственный университет
Тюмень, Россия

Аннотация. В представленной работе изучается поведение тонкой пленки жидкости, содержащей летучую компоненту, при локальном нагреве твердой горизонтальной подложки. При достаточных повышении температуры подложки и первоначальной толщине пленки формируется специфическая форма поверхности – «жидкая капля», отделенная тонким протяженным слоем от основной массы жидкости, связанная с последовательным возникновением термо- и концентрационно-капиллярным разнонаправленными течениями.

Abstract. This work is devoted to the study of the behavior of a thin liquid film containing a volatile component during local heating of a solid horizontal substrate. With a sufficient increase in the temperature of the substrate and the initial thickness of the film, a specific surface shape is formed – a “liquid drop”, separated by a thin extended layer from the main volume of the liquid, associated with the sequential appearance of thermo- and concentration-capillary multidirectional flows.

Пусть тонкий слой однородного раствора расположен на плоской горизонтальной поверхности. Газ над пленкой содержит пары летучей компоненты, находящиеся в термодинамическом равновесии с жидкостью. В некоторый момент времени подложка мгновенно нагревается, что приводит к деформации пленки. Модель соответствует [1] и учитывает лапласовский скачок давления на границе раздела фаз, а также влияние кривизны поверхности на давление насыщенного пара. Представленные иллюстрации оответствуют водному раствору изопропанола (IPA), параметры которого примем как в [2]. Начальная температура $T_0=293\text{K}$, начальная массовая концентрация IPA $C_0=0.5$, молярная масса летучей компоненты $M_{IPA}=M_V=60\text{ г/моль}$, воды – $M_W=18\text{ г/моль}$, плотности жидкостей $\rho_{al}=786\text{ кг/м}^3$, $\rho_w=998\text{ кг/м}^3$; коэффициент вязкости $\mu=3\text{ мПа}\cdot\text{с}$, теплопроводности – $k=0.6\text{ Вт/((м}\cdot\text{K))}$, диффузии паров – $D_V=2\cdot 10^{-5}\text{ м}^2/\text{с}$, теплота парообразования $L_V=756\text{ кДж/кг}$ давление насыщенных паров $p_v^{al}(T_{st})=4.1\text{ кПа}$, коэффициент комодации $\alpha_{com}=1$.

На рис. 1 слева изображено начало деформации пленки. Представлены зависимости толщины слоя жидкости $h_*=h/d$ (нижним индексом звездочка обозначены безразмерные параметры) от радиальной координаты r_* . Кривые соответствуют последовательным моментам времени $t=0.05, 0.25, 0.5$ (с) ($t_*=0.1, 0.5, 1$).

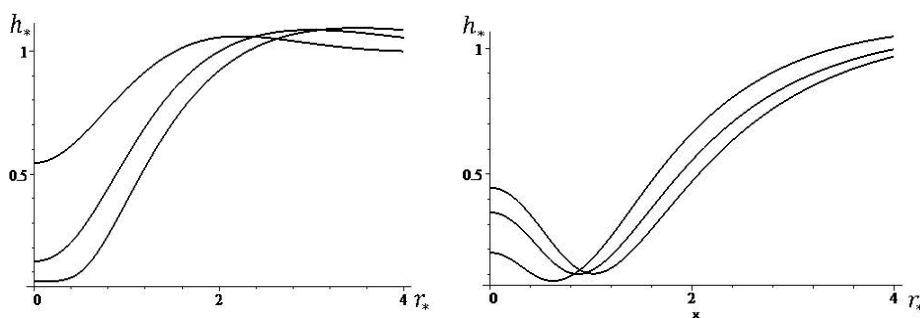


Рис. 1. Зависимости толщины слоя жидкости $h_*=h/d$ от радиальной координаты $r_*=r/a$ слева – в моменты времени $t=0.05, 0.25, 0.5$ (с), справа – в моменты времени $t=2.5, 5, 7.5$ (с)

Пленка проявляет характерный термический эффект, происходит быстрый прогрев свободной поверхности, сопровождающийся ее прогибом вниз. Изменение концентрации на этом временном интервале невелико благодаря быстрому насыщению парами нижней части воздушной прослойки, контактирующей с поверхностью жидкости. Действительно, характерное время прогрева пленки τ_T является малой величиной относительно характерного времени диффузии паров τ_v [5]. Отходящий гребень оставляет за собой пленку порядка нескольких микрон. Этот тонкий слой ведет себя уже как диффузионный. После значительного прогиба вниз верхней поверхности пленки происходит быстрое снижение концентрации летучей компоненты, вследствие чего увеличивается коэффициент поверхностного натяжения и начинается приток жидкости к центру нагрева. Уход летучей компоненты из раствора вновь обязан диффузионному потоку паров над жидкой пленкой от центра в сторону менее нагретой поверхности и в вертикальном направлении, для оставшегося в центральной части жидкого слоя уменьшенной толщины характерное время диффузии паров τ_v является уже малой величиной относительно характерного времени эволюции τ_h . На рис. 1 справа представлена дальнейшая деформация пленки. Кривые соответствуют моментам времени $t=2.5, 5, 7.5$ (с) ($t_*=5, 10, 15$). Наблюдается рост бугорка жидкости в вертикальном и горизонтальном направлениях.

К моменту времени $t \approx 15$ (с) наблюдается значительное изменение формы профиля свободной поверхности – образуется «жидкая капля». Капля «сидит» на пленке практически постоянной толщины порядка одного микрон (рис. 2 слева).

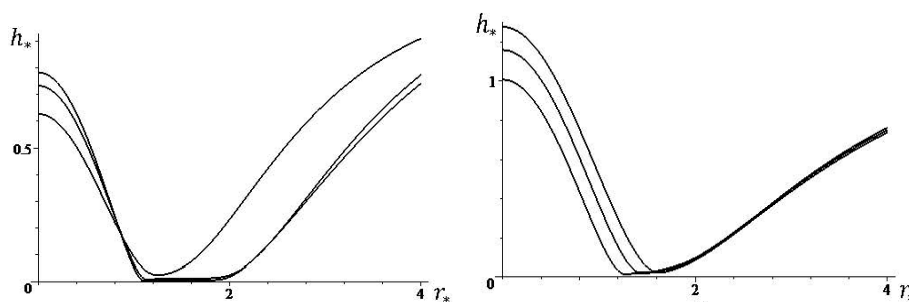


Рис. 2. Профили жидкого слоя в моменты времени $t=15, 30, 45$ (с) слева, $t=100, 150, 200$ (с) справа

Гребень волны основной массы жидкости уходит далеко от центра нагрева. Этот эффект связан не только с термическим течением, но и концентрационным. На гребне происходит конденсация паров летучей компоненты, дополнительно уменьшающая коэффициент поверхностного натяжения. При этом сама капля практически не меняется в диаметре, но набирает силу. Отсидевшись достаточно времени, капля вновь начинает расти. Этому способствует приближение гребня к капле, обусловленное уменьшением притока летучей компоненты (рис. 2 справа).

Литература

1. Бородина К. А. Модель эволюции пленки бинарного гомогенного раствора при тепловом воздействии // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. 2020. Том 6. № 4 (24). С. 48-68. DOI: 10.21684/2411-7978-2020-6-4-48-68.
2. Tatosova K.A., Malyuk A.Yu., Ivanova N.A. Droplet formation caused by laser-induced surface-tension-driven flows in binary liquid mixtures // Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects. 2017. Vol. 521. Pp. 22-29. DOI: 10.1016/j.colsurfa.2016.07.004.
3. Иванова Н.А., Бородина К. А. Термокапиллярное движение тонкой пленки бинарного спиртосодержащего раствора // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Математика. Механика. Информатика. 2020. Том 20. № 1. С. 64-78. DOI: 10.18500/1816-9791-2020-20-1-64-78.

ГЕОКРИОЛОГИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ В КРИОЛИТОЗОНЕ

Великин С. А., Чжан Р. В., Минова Е. Н.
Институт мерзлотоведения им. П. И. Мельникова СО РАН
г. Якутск, Россия

Аннотация. При проведении мониторинга гидротехнических сооружений предлагается использовать ряд методических приемов, позволяющих обнаруживать негативные процессы и явления, происходящие задолго до критических ситуаций, например развитие гиперфильтрации при оттаивании трещиноватых пород. Эти методики отрабатывались на Вилуйской ГЭС- 1,2.

Abstract. When conducting monitoring, it is proposed to use a number of methodological techniques that allow detecting negative processes and phenomena in the operation of structures that occur long before critical situations, such as the development of hyperfiltration during thawing of fractured rocks, and other phenomena. These methods were worked out on the flagship of the energy system in western Yakutia – Vilyuyskaya hydroelectric power station-1, 2.

Статистические данные, описывающие состояние гидротехнических сооружений показывают, что 76% аварийных ситуаций на ГЭС мира связаны с развитием природных и техногенных геологических процессов и лишь 24% – с дефектами инженерных конструкций и качеством строительства [1]. Особо сложная ситуация состояния гидротехнических сооружений (ГТС) складывается в условиях криолитозоны на фоне глобального потепления климата. Основная опасность этих процессов связана с переходом мерзлых грунтов оснований в талое состояние. Это обычно происходит в местах их примыкания к основаниям и берегам, сопровождающееся с потерей фильтрационной и статической устойчивости, как отдельных частей ГТС, так и гидроузлов в целом. Все эти обстоятельства требуют оперативного контроля геокриологического состояния сооружений гидроузла, как единой природно-технической системы.

При создании систем геокриологического контроля следует учитывать, что объективность выводов о состоянии гидротехнических объектов зависит от многих факторов: достоверности первичной информации о геокриологической ситуации строительной площадки на момент строительства; достоверности информации о физико-механических и фильтрационных свойствах грунтов, параметров температурных полей в теле и основаниях ГТС.

Несмотря на имеющийся опыт мониторинга ГТС (мерзлотная инспекция, режимные наблюдения за деформациями и параметрами фильтрационных таликовых зон и др.) исследования подобного рода все еще остаются уникальными не только из-за особенностей объектов, но и по ряду других причин. Например, из-за отсутствия должного Регламента мониторинга состояния ГТС в криолитозоне.

Неопределенность в пространственном распределении границ и свойств трещиноватых зон и литологической разнородности пород строительных площадок ГТС обуславливает соответствующую неточность в прогнозировании направлений развития фильтрационных потоков (или деградации многолетнемерзлых пород). В этих условиях вполне вероятен пропуск начала развития фильтрационного потока по данным только температурных наблюдений, проводимых, к тому же, по редкой пространственно-временной сетке. Это обстоятельство вносит не только элемент неожиданности в прогнозные оценки особенностей температурного поля, но и способствует возникновению напряженно-деформационных зон, обходной фильтрации и, как следствие, приводит к изменению состояния всего сооружения.

В связи с этим в последние годы ряд аварий связанных деградацией мерзлых оснований, на наш взгляд, зависит от нескольких основных факторов.

Первый фактор состоит в том, что нарушение естественного геокриологического режима на участках возведения гидротехнических сооружений приводит их в аварийное состояние.

Второй фактор состоит в том, что Регламенты эксплуатации объектов гидротехнических сооружений в земельном кодексе Российской Федерации (ЗК РФ) данное обстоятельство не предусматривают за пределами самих гидротехнических сооружений. Тем самым оказалось, что такие Регламенты требуют корректировки.

Третий фактор состоит в том, что при длительных воздействиях гидроузлов на геокриологические условия прилегающих к ним территориям, требуют срочной разработки методов выявления и контроля, зарождения и развития негативных инженерно-геокриологических процессов, приводящих к потери устойчивости сооружений. К таким методам можно отнести, в частности, инженерно-геофизические, которые хорошо зарекомендовали себя с 90-х годов прошлого столетия (Рис. 1.).

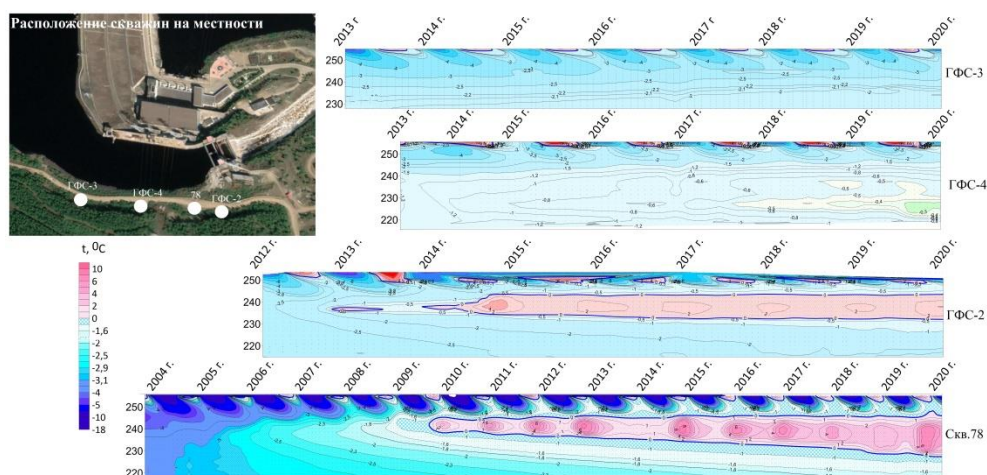


Рис. 1. ВГЭС-1,2. Правобережное примыкание. Динамика температур пород по скважинам

В представляемом докладе приводятся результаты долговременных исследований по геокриологическому контролю правобережного примыкания Вилуйской ГЭС-1,2. Исследования показывают, что трансформация геокриологических условий, влияющих на устойчивость сооружений, оказывает воздействия на относительно больших расстояниях в верхнем бьефе плотины. Причем время переходов мерзлых пород в талое состояние изменяется от десятков лет до нескольких месяцев.

Последнее обстоятельство показывает необходимость создания для подобных объектов общей системы интеллектуально оперативного контроля всей температурной ситуации по достаточно детальной сети температурных скважинных наблюдений с обязательным привлечением геофизических методов, используя скважинные наблюдения в качестве опорных для достоверной интерпретации [2].

В настоящий время, по мнению авторов, необходимы срочные работы по аккумулярованию многолетних наблюдений по наиболее значимым и проблемным ГТС криолитозоны в единую базу данных которая позволит аналитическим центрам прогнозировать устойчивость сооружений. Первым шагом такой работы является обобщающий труд [2].

Литература

1. Харькина М. А., Горбушина В. К. Экологические издержки гидроэнергетики // Энергия: экономика, техника, экология. – 2004. – N4. – С. 32-39.
2. Чжан Р.В. Грунтовые плотины в криолитозоне России / Р.В. Чжан, С.А. Великин Г.И. Кузнецов Н.В. Крук; Сиб. отд-ние Рос. акад. наук. – Новосибирск: Академическое издательство «Гео», 2019. – 427 с.

МЕХАНИЗМ И КРИТЕРИИ ВЕТВЛЕНИЯ ТРЕЩИНЫ

Алексеев А. А., Сыромятникова А. С., Большев К. Н., Иванов В. А.
Институт физико-технических проблем Севера им. В. П. Ларионова СО РАН
Россия, Якутск

Аннотация. Для исследования ветвления трещины выполнен анализ критериев и механизмов ветвления трещины. Рассмотрены работы по исследованию ветвления трещины в полимерах и стали, фрактографическому исследованию поверхности разрушения; критерии ветвления трещины как динамический коэффициент интенсивности напряжений, скорость трещины. Установлено, что трещина при ветвлении в хрупких пластиках достигает предельной скорости распространения $V^*=500\text{--}800$ м/с.

Abstract. For crack branching research, an analysis of the criteria and mechanisms for crack branching. The investigations of crack branching in polymers and steel, fractographic investigation of the fracture surface are considered; criteria for crack branching as a dynamic stress intensity factor, crack speed. It is established that the crack at branching in brittle plastics reaches the limiting propagation speed $V^*=500\text{--}800$ m/s.

Одной из малоизученных проблем современной механики и физики разрушения твердого тела является ветвление трещины, которое наблюдается в таких кристаллических и аморфных материалах, как стекло, сталь, алюминий, полимеры и скальные породы.

Анализ теоретических и экспериментальных работ Е. Yoffe [1], С. В. Серенсена [2], В. М. Финкеля [3], К. Ravi-Chandar, W. G. Knauss [4-5], J. Fineberg [6], И. Н. Бедия [7], О. Б. Наймарка [8], С. В. Уварова [9], А. S. Kobayashi [10] по исследованию ветвления трещин в материалах различной природы показывает, что параметром, контролирующим переход трещины от прямолинейного распространения к режиму ветвления, является критическое значение скорости распространения трещины V^* (предельная скорость), причем $V^* < V_R$ (V_R – скорость волны Рэлея), и равна не определенной части V_R , а зависит от материала. По результатам экспериментальных исследований, установлено, что трещина при ветвлении в номинально хрупких материалах – хрупких пластиках достигает предельной скорости распространения $V^*=500\text{--}800$ м/с [2, 4–9] (рис. 1).

Существует два фундаментально различных подхода для объяснения механизма ветвления трещины при достижении V^* . Ветвление трещины по Е. Yoffe [1], В. М. Финкелю [3], J. Fineberg [6], И. Н. Бедию [7], О.Б. Наймарку [8], С. В. Уварову [9] происходит в основном при инерционной перестройке поля напряжения, и, следовательно, зависит от достижения трещиной определенной скорости, связанной с характерными скоростями волн в материале. Однако, экспериментальные факты свидетельствуют, что между V^* и характерными скоростями волн в материале корреляция отсутствует, V^* сильно зависит от состава материала, экспериментально измеренные значения V^* значительно ниже порога Yoffe.

В моделях К. Ravi-Chandar, W. G. Knauss [4–5], А. S. Kobayashi [10], основанных на эволюции зоны процесса трещинообразования, ветвление трещины связано с изменением поведения материала около вершины трещины при достижении V^* , которая зависит от свойств материала в пределах зоны процесса трещинообразования. В соответствии с этими моделями ветвление трещины происходит в результате волнового взаимодействия между микроветвями и магистральной трещиной и является процессом скорее стохастичным, тогда как экспериментально наблюдается его детерминированность.

В настоящее время можно считать до конца не установленным физический механизм перехода трещины от прямолинейного распространения к ветвлению, объясняющий существование экспериментально наблюдающейся предельной скорости

распространения трещины V^* . Следует отметить, что ветвление трещины изучалось в основном на модельном материале – хрупких пластиках полиметилметакрилат, эпоксидная смола, Nomalite-100 [2, 4–5, 6, 7, 8, 9, 12], и из-за технических сложностей в получении ветвления трещины при разрушении образца в единичных работах исследовалось ветвление трещины в конструкционном материале – сталь [3, 11, 13].

Таким образом, экспериментальное исследование закономерностей разрушения при распространении трещин с ветвлением в материалах различной природы имеет важное значение и в фундаментальном, и в прикладном аспектах, и является актуальной задачей разработки методов прогнозирования прочности и долговечности твердых тел.

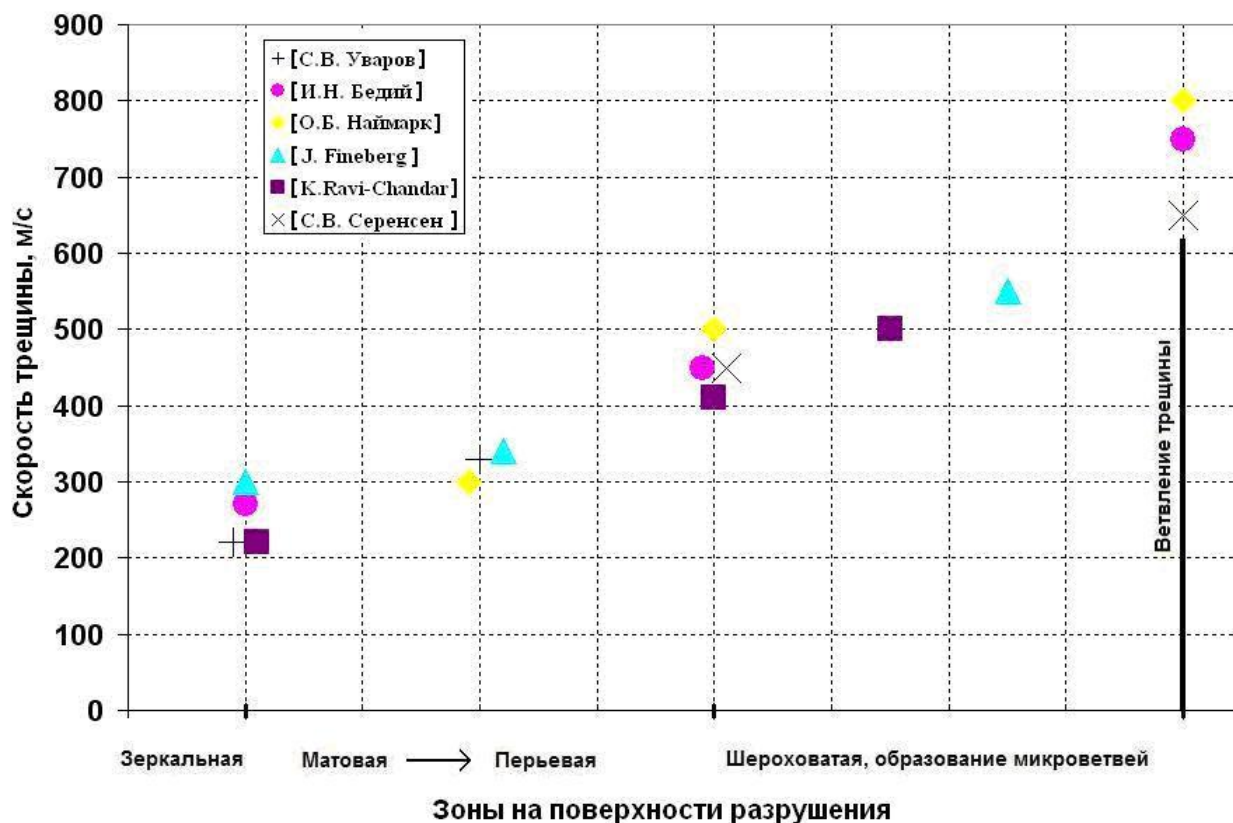


Рис. 1. Экспериментально измеренные значения скорости распространения трещины в хрупких пластиках на различных этапах.

Литература

1. Yoffe E. The moving Griffith crack / E. Yoffe // Philosophical Magazine. – 1951. – №42. – P. 739–750.
2. Немец Я., Серенсен С.В., Стреляев В.С. Прочность пластмасс. – М.: Машиностроение, 1970. – 335 с.
3. Финкель В.М. Физика разрушения. – М.: Металлургия, 1970. – 376 с.
4. Ravi-Chandar K. Dynamic fracture of nominally brittle materials / K. Ravi-Chandar // International Journal of Fracture. – 1998. – №90. – P.83-102.
5. Ravi-Chandar K. An experimental investigation into dynamic fracture. III. On steady-state crack propagation and crack branching / K. Ravi-Chandar, W.G. Knauss // International Journal of Fracture. – 1984. – №26. – P.141-154.
6. Sharon E. Microbranching instability and the dynamic fracture of brittle materials / E. Sharon, J. Fineberg // Physical Review B. – 1996. – V.54, №10. – P.7128-7139.
7. Бедий И. Н. Кинетика быстрых трещин и их ветвление: Автореф. дисс. ... канд. техн. наук / ИПП АН УССР. – Киев, 1990. – 17 с.
8. Динамическая стохастичность и скейлинг при распространении трещины / О.Б. Наймарк, В.А. Баранников, М.М. Давыдова и др. // Письма в ЖТФ. – 2000. – Т.26, Вып. 6. – С.67-77.
9. Уваров С.В. Экспериментальное исследование эффектов нелинейной динамики распространения трещин: Автореф. дисс. ... канд. физ.-мат. наук / ИМСС УрО РАН. – Пермь, 2000. – 16 с.
10. Kobayashi A.S. Mechanics of crack curving and branching – a dynamic fracture analysis / A.S. Kobayashi, M. Ramulu // International Journal of Fracture. – 1985. – №27. – P.187-201.

11. Даффи А.Р., МакКлур Дж.М., Айбер Р.Дж., Мэкси У.А. Практические примеры расчета на сопротивление хрупкому разрушению трубопроводов под давлением / Разрушение. В 7 т, т. 5. – М.: Машиностроение, 1977. С. 146-209.
12. A. A. Alexeev, K.N. Bolshev, V.A. Ivanov, A.S. Syromyatnikova, A. M. Bolshakov, A.S. Andreev. Experimental study of crack branching velocity in polymers // Inorganic materials. 2019. Vol. 55, № 15. P. 1476-1480.
13. A. A. Alekseev, K. N. Bol'shev, V. A. Ivanov, A. S. Syromyatnikova, A. M. Bol'shakov, A. R. Ivanov. Experimental determination of the rate of crack branching in steel // Russian Metallurgy (Metally). 2020. №10. P. 1222-1224.

ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН СВЧ-ДИАПАЗОНА НА ТЕМПЕРАТУРНОЕ ПОЛЕ ЗАМЕРЗШИХ БИОЛОГИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

Алексеев Р. З., Андреев А. С., Семенов С. О., Лукин Е. С., Федоров М. В.
ЯНЦ СО РАН, ЯНЦ КМП СО РАН, Якутск, Российская Федерация

Аннотация. На сегодняшний день можно считать установленным, что тепловая схема тела человека состоит из «ядра» включающего в свой состав головной мозг, внутренние органы грудной и брюшной полостей, и «оболочки» состоящий из кожи, подкожной основы и поверхностных мышц. Целью нашей разработки является, спроектировать прибор для медленного бесконтактного размораживания конечностей получивших холодовую травму, предварительно теплоизолированных от внешней положительной температуры. Проведены измерения температуры мышечной ткани свиньи получившей обморожение в экспериментальных условиях. С последующим бесконтактным разогревом волнами СВЧ диапазона низкой мощности, предварительно помещенного в теплоизоляционный материал из синтепона. Так как теплоизоляционный материал радиопрозрачен для СВЧ диапазона, нагревающий эффект будет действовать непосредственно на исследуемый образец. Представлены графики изменения температуры на различных участках образца с течением времени.

Abstract. Today it can be considered established that the thermal scheme of the human body consists of a "core" including the brain, internal organs of the chest and abdominal cavities, and a "shell" consisting of the skin, subcutaneous base and superficial muscles. The purpose of our development is to design a device for slow, non-contact defrosting of the extremities of those who have received a cold injury, previously insulated from an external positive temperature. Measurements of the temperature of the muscle tissue of a pig that received frostbite were carried out under experimental conditions. With subsequent contactless heating by low-power microwave waves, previously placed in a heat-insulating material made of padding polyester. Since the heat-insulating material is radio-transparent for the microwave range, the heating effect will act directly on the sample under study. The graphs of temperature changes in different parts of the sample over time are presented.

Одной из задач современной клинической медицины является поиск методов лечения отморожений конечностей, позволяющих сократить сроки временной утраты трудоспособности и предотвратить инвалидизацию больных. При отморожениях, лечение должно быть направлено на сохранение жизни пострадавших от холодовой травмы, по возможности быстрое восстановление кровообращения и нарушенного тканевого обмена. Материальные затраты на лечение пострадавших от отморожений в 3 раза превышают стоимость лечения общехирургического больного [1]. Несмотря на многолетнее изучение процессов патогенеза отморожений и разработку новых методов лечения, высока частота неудовлетворительных результатов терапии и инвалидизации лиц трудоспособного возраста, что во многом обусловлено ошибками в диагностике степени и прогнозировании исхода отморожения в ранние периоды травмы. Это обстоятельство делает актуальным более детальное

изучение основных звеньев патогенеза локальной холодовой травмы, совершенствование методов диагностики и подбор патогенетически обоснованной терапии. Травмированную конечность максимально теплоизолируют от внешней среды и применяют различные средства для ускорения кровообращения [2]. Новизна исследования заключается в подтверждении радиопрозрачности теплоизоляционного материала для электромагнитного СВЧ излучения. Следовательно, в постепенном согревании конечности изнутри на границе начала обморожения, для постепенного увеличения температуры и ускорения кровообращения.

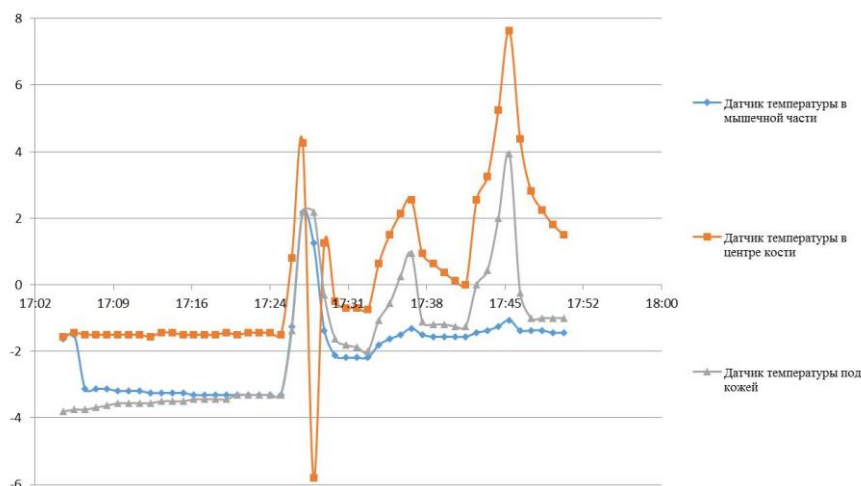


Рис. 1. График изменения температур биообъекта под действием влияния СВЧ – излучения 200 Вт

Литература

1. Алексеев Р.З., Алексеев Ю.Р., Семенова С.В. Возможно ли прижизненное оледенение тканей при отморожениях / Международный журнал экспериментального образования. – 2015. – № 5-1. – С. 18-20.
2. A. V. Stepanov, V. A. Ivanov, A. V. Malyshev, A. A. Stepanov and S. N. Soldatov. "Efficiency of Heat-Insulating Materials Based on Artificial and Natural Components," // 2020 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon), Vladivostok, 2020, pp. 1-3.

НЕРАВНОВЕСНЫЕ УСЛОВИЯ ВБЛИЗИ МЕЖФАЗНОЙ ГРАНИЦЫ ЖИДКОСТЬ-ПАР ПРИ ФАЗОВОМ ПРЕВРАЩЕНИИ

Гатапова Е. Я.1, Граур И. А.2

¹ Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1, gatapova@itp.nsc.ru
² Aix-Marseille Université, CNRS, IUSTI UMR 7343, 13013 Marseille, France

Аннотация. Для оптимизации размеров высокоэффективных охлаждающих устройств с микронными размерами, например для смартфонов, нужны фундаментальные знания о процессах с фазовыми переходами на микромасштабе. В работе представлены совершенно новые экспериментальные данные о профилях температур вблизи межфазной границы, а также скоростей испарения. Результаты прямого численного моделирования тепломассообмена на основе кинетических уравнений хорошо согласуются с численными расчетами методами молекулярной динамики для одноатомного газа.

Abstract. To optimize the size of high-performance cooling micro-devices such as smartphones requires fundamental knowledge of micro-scale phase change phenomena. We present new experimental data on the temperature profiles near the interface, as well

as the rates of evaporation. The results of direct numerical simulation of heat and mass transfer based on kinetic equations are in good agreement with results by molecular dynamics simulations for a monatomic gas.

Оптимизация размеров электронных устройств требует новых подходов к изучению тепломассопереноса на микромасштабе. В частности, развитие высокоэффективных теплообменников, паровых камер и тепловых трубок с микронными размерами, требуют новых фундаментальных знаний о процессах с фазовыми переходами. Необходимы более тонкие экспериментальные подходы для исследования межфазных условий при испарении, конденсации и кипении. Настоящая работа посвящена изучению профиля температуры вблизи границы раздела жидкость-пар вблизи слоя Кнудсена.

За последние два десятилетия разные авторы [1–2] измерили профили и скачок температуры на границах раздела жидкость-пар/газ. Во всех этих экспериментах скачок температуры, измеренный на границе раздела, оказался неожиданно большим, намного большим, чем предсказываемый кинетической теорией газов. Лишь недавно появилась новая серия измерений [3], в которой скачок температуры оказался значительно меньше. Также стоит отметить, что еще в недавних работах [2] измеренная температура пара вблизи границы раздела была выше, чем температура границы раздела. Положительные значения разности температур между температурой жидкости и пара на границе раздела (температура пара ниже температуры границы раздела) были измерены только авторами [3]. В [4] разработан кинетический подход, описывающий рассматриваемое явление.

В данной работе представлены совершенно новые экспериментальные данные по температурному профилю, выполненные на новой установке с контролируемыми условиями, Рис. 1. Установка позволяет измерять профили температуры при различных режимах насыщения, изменяя давление. Измерения проводились с помощью различных микротермопар с характерным размером 2–3 мкм. Оптическая система также используется для визуализации потока и управления движением термодпары. Показано, что скачки температур зависят от скорости испарения и теплового потока, а его рост приводит к увеличению скачка температуры на границе раздела. Температурные скачки регистрировались на границе раздела, регистрировались моды как с положительным, так и с отрицательным скачком, а также с отсутствием скачка температуры. Эксперименты хорошо описываются качественно с кинетической теорией и соотношениями Онзагера-Казимира. Результаты данных экспериментов, выполненные в широком диапазоне давления, дают обобщение и объяснение предыдущих работ о скачке температур на межфазной границе.

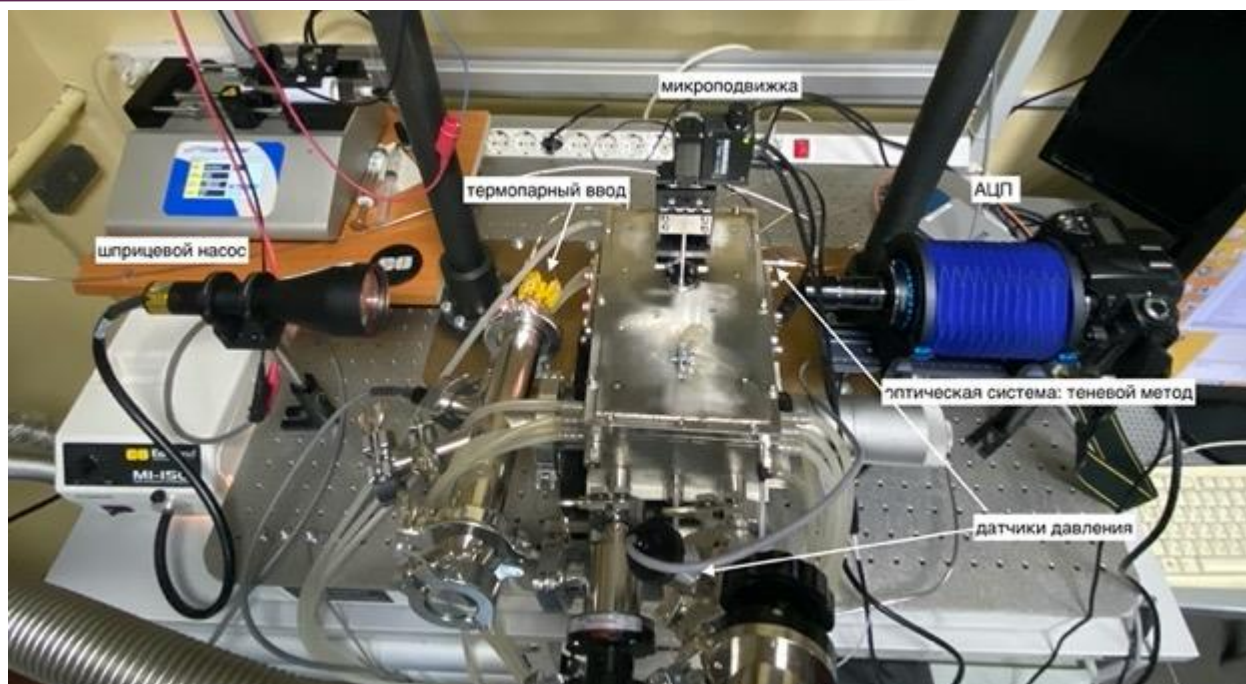


Рис. 1. Экспериментальная установка.

В работе также представлены результаты прямого численного моделирования тепломассообмена на основе уравнений Больцмана. Результаты сравниваются с существующими аналитическими формулами, а также с расчетами методами молекулярной динамики (MD) для описания процесса испарения/конденсации на границе раздела жидкость-пар. В частности, сравниваются формулы Герца-Кнудсена, Шраже-Майлса, и наши расчеты с помощью моментного метода и S – модели. Подробно моделируется профиль температуры в слое Кнудсена и за его пределами. Особое внимание уделяется коэффициентам испарения и конденсации. Получено хорошее согласование между результатами, полученными моментным методом, численным решением кинетического уравнения S-модели и численных MD расчетов для одноатомного газа в случае медленного и умеренного испарения. В случае относительно сильного испарения расчеты по нелинейной кинетической S-модели хорошо согласуются с MD расчетами.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского Научного Фонда (проект 20-19-00722).

Литература

1. Shankar P.N., Deshpande M.D., On the temperature distribution in liquid-vapor phase change between plane liquid surfaces // Phys. Fluids A – 1990. – 2. – 1030–1038.
2. Ward C.A., Fang G., Expression for predicting liquid evaporation flux: Statistical rate theory approach // Phys. Rev. E – 1999. – 59. – 429–440.
3. Gatapova E.Y., Graur I.A., Kabov O.A., Aniskin V.M., Filipenko M.A., Sharipov F. and Tadrist L., The temperature jump at water – air interface during evaporation. // International Journal of Heat and Mass Transfer – 2017 – 104. – 800–812.
4. Polikarpov A.Ph., Graur I.A., Gatapova E.Ya., Kabov O.A., Kinetic simulation of the non-equilibrium effects at the liquid-vapor interface. // International Journal of Heat and Mass Transfer – 2019 – 136. 449 – 456.

СТРУКТУРА И ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ МНОГОСЛОЙНЫХ «НАНОЛУКОВИЦ» НИТРИДА БОРА ИЗ ГРУППЫ МАЛЫХ РАЗМЕРОВ $2 < D < 30$ НМ

Заричняк Ю. П.¹, Иванов В. А.², Марова А. А.¹, Николаев И. Н., Пилипенко Н. В.¹

¹ Национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики Санкт-Петербург, Россия

² Институт физико-технических проблем Севера им. В. П. Ларионова СО РАН Якутск, Россия

³ Северо-Восточный Федеральный университет Якутск, Россия

Борнитридные многослойные концентрические наносферы BN NS (Boron Nitride Nano Spheres, чаще называемые «нанолуковицами» – «Nano Onions») представляют собой новую аллотропную (после известных кубической c-BN и гексагональной h-BN) структурную форму соединения атомов бора и азота, показанную на рис.1. В группу малых наносфер входят нанолуковицы с диаметрами: $2 < D < 30$ нм, и числом слоёв от 2 до 45.

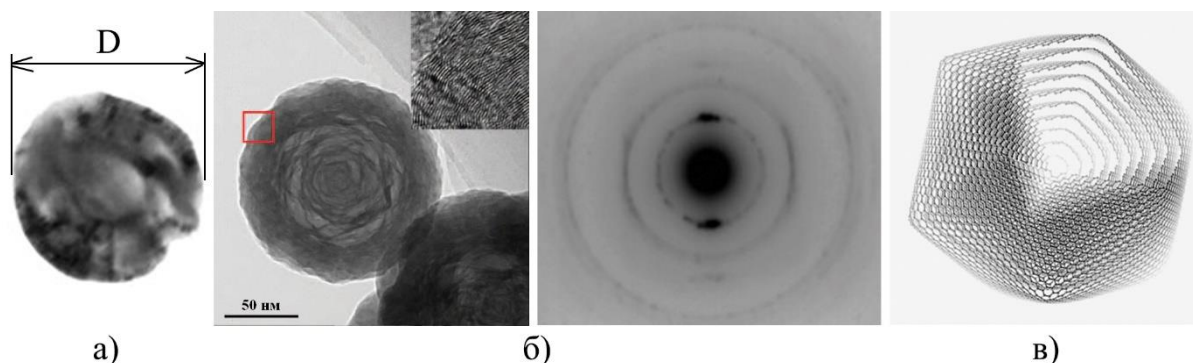


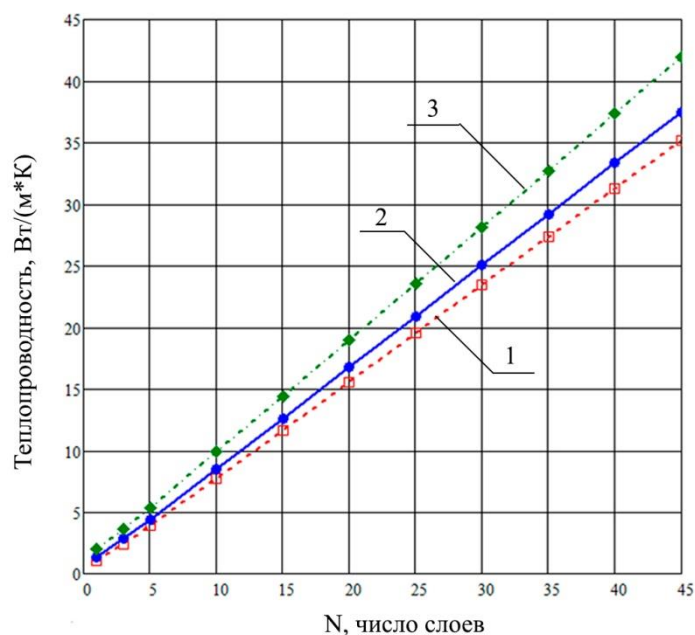
Рис. 1: а – борнитридная многослойная наносфера [1], б – её микроэлектроннограммы [1, 2], в – икосаэдрическая многослойная модель структуры

В 2013–2014 г. физики университета Яньшань, Китай [2], спеканием нанолуковиц BN NS при высоких (108 ГПа) давлениях и температурах в диапазоне 1000–1600 °С синтезировали из них новый сверхтвёрдый материал, превосходящий алмазы по твердости и термостойкости [2]. Оптимизация режима спекания требует знания теплопроводности и температуропроводности исходного сырья. Созданный из наноконпонентов материал оказался дешевле синтетических алмазов и более термостойким – выдерживает нагрев до температуры 1300 °С в присутствии кислорода без заметного ухудшения свойств.

Нами разработана модель и методика расчёта (прогноза) теплопроводности луковичных структур BN NS с учётом размера внутренней полости, межслойного расстояния, числа слоёв и теплопроводности гексагонального нитрида бора h-BN в продольном и поперечном направлении.

Если принять теплопроводность гексагонального нитрида бора h-BN вдоль слоя равной 400 Вт/(м·К), [3], то теплопроводность многослойных бор нитридных наносфер BN NS будет изменяться в пределах от 1 до 35 Вт/(м·К) (в зависимости от числа слоев в «нанолуковице»).

Если теплопроводность h-BN вдоль слоя будет равна 600 Вт/(м·К), то теплопроводность многослойных бор нитридных наносфер BNNS, будет изменяться в диапазоне от 1,3 до 37 Вт/(м·К). Если теплопроводность h-BN вдоль слоя принять равной 1000 Вт/(м·К), то теплопроводность наносфер находится в диапазоне от 2 до 42 Вт/(м·К). Результаты расчётов представлены на рис. 2.



- 1 - при теплопроводности h-BN вдоль слоя, равной 400 Вт/(м*К);
 2 - при теплопроводности h-BN вдоль слоя, равной 600 Вт/(м*К);
 3 - при теплопроводности h-BN вдоль слоя, равной 1000 Вт/(м*К).

Рис. 2. Теплопроводность луковичных структур BN NS в зависимости от числа слоев в «нанолуковице»

Литература

1. Особенности структуры частиц нитрида бора, получаемого методом карботермического синтеза / В. И. Ляшенко [и др.] // Сверхтвердые материалы. – 2008. – № 5. – С. 3-6.
2. Ultrahard nanotwinned cubic boron nitride / Yongjun Tian, Bo Xu, Dongli Yu, Yanming Ma, Yanbin Wang, Yingbing Jiang, Wentao Hu, Chengchun Tang, Yufei Gao, Kun Luo, Zhisheng Zhao, Li-Min Wang, Bin Wen, Julong He & Zhongyuan Liu // Nature. – 2013. – Vol. 493. – P. 385-388.
3. _Anisotropic thermal_ transport _in bulk hexagonal boron nitride. <https://www.researchgate.net/publication/324907955>

МОДЕЛИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И ПРОЦЕССОВ ПЕРЕНОСА ТЕПЛА В ЗАСЫПКАХ МИКРО- И НАНОПОРОШКОВ АЛЮМИНИЯ

Заричняк Ю. П.¹, Иванов В.А.², Марова А. А.¹, Николаев И. Н., Ходунков В. П.

¹Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики

Санкт-Петербург, Россия

²Институт физико-технических проблем Севера им. В. П. Ларионова СО РАН
г. Якутск, Россия

³Северо-Восточный федеральный университет им. М. К. Аммосова
г. Якутск, Россия

⁴Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии
г. Санкт-Петербург, Россия

Стремление к минимизации операций формирования металлических деталей, снижению затрат материалов, энергии и времени изготовления деталей привели к развитию порошковой металлургии. Процесс изготовления деталей состоит из двух этапов – прессования порошка и последующего спекания температура и длительность которого существенно снижаются с уменьшением размера частиц порошков и первичной пористости прессовок [1].

Оптимизация технологических режимов спекания требует знания теплофизических свойств спекаемых порошков их теплоёмкости и теплопроводности. Уменьшение размера частиц с одной стороны приводит к сокращению длительности спекания, но с другой стороны приводит к снижению теплопроводности порошков, как правило, на полтора-два порядка по сравнению с теплопроводностью монолитного металла, что увеличивает длительность спекания.

В порошках микрометрового диапазона с размером частиц 1–100 мкм основное снижение теплопроводности порошков происходит за счёт увеличения пористости засыпок и уменьшения теплопроводности газа между частицами (эффект Смолуховского-Кнудсена) когда расстояния между поверхностями контактирующих частиц становятся меньше длины свободного пробега молекул газа [2].

В суб-микронном нанодиапазоне 10–1000 нм размеров частиц наряду со снижением теплопроводности газа между частицами происходит существенное (десятки и сотни %) снижение теплопроводности самих частиц металла за счёт снижения интенсивности переноса тепла электронами, а затем и фононами [3].

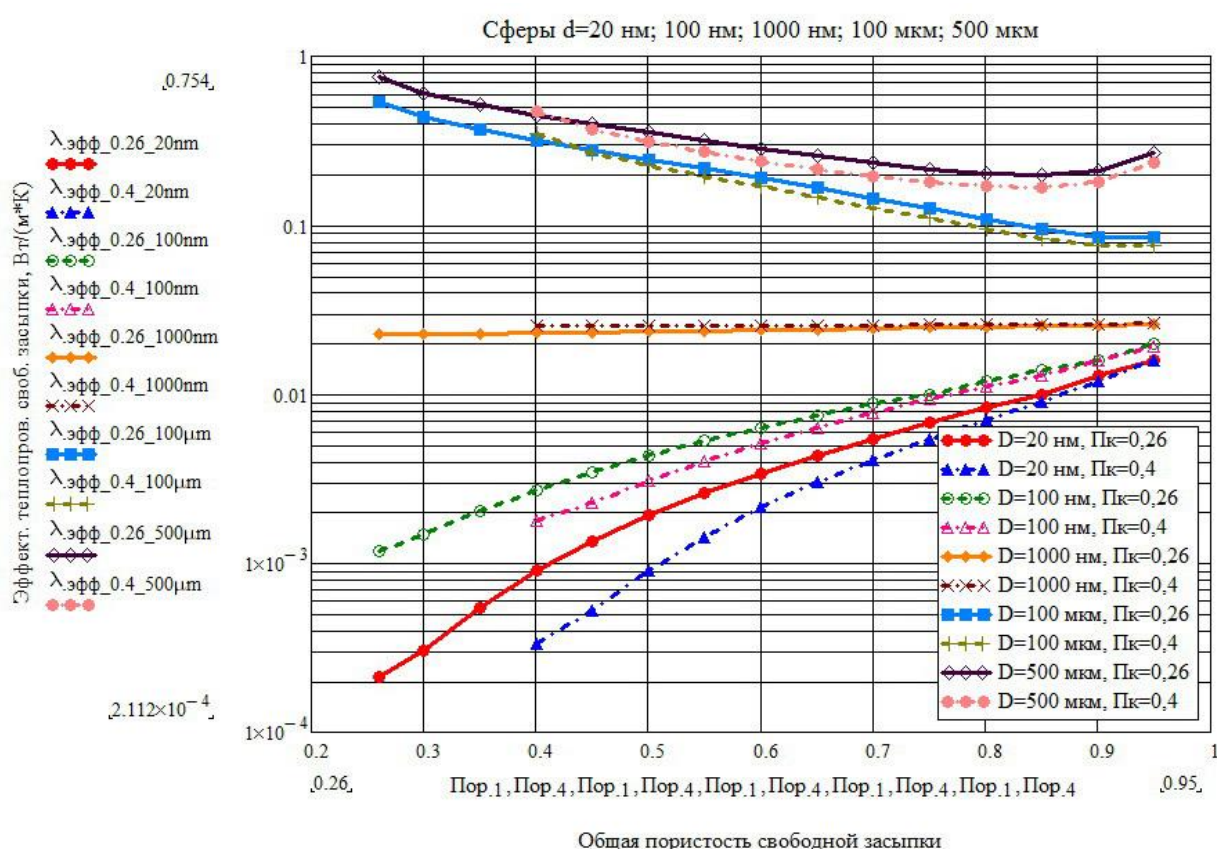


Рис. 1. Изменение эффективной теплопроводности свободных засыпок микро- и нанодисперсных порошков алюминия

Предложена модификация модели засыпок порошков и методики расчёта их эффективной теплопроводности с учётом изменения физических процессов переноса тепла по газу между частицами и теплопроводности самих частиц в микро- и нано-диапазонах размеров частиц порошков [3,4]. Результаты расчётов представлены на рис. 1.

Литература

1. Ультрадисперсные наноразмерные порошки: создание, строение, производство и применение / под ред. акад. В.М. Бузника. – Томск: Изд-во НТЛ, 2009. – 192 с.
2. Теплопроводность газов <http://thermalinfo.ru/svojstva-gazov/>
3. Заричняк Ю П Структура, теплофизические свойства и характеристики композиционных материалов и сплавов. докт. дисс.. Институт теплофизики СО РАН, Новосибирск, 1989. 460 с, с ил.

4. Заричняк Ю.П., Иванов В.А., Примаков К.И., Ходунков В.П. Структура и теплопроводность бинарных порошковых композитов с диффузионным взаимодействием твёрдофазных компонентов при спекании. Научно-практическая конференция «Теплофизика и энергетика арктических и субарктических территорий», Якутск, 24 – 27 июня 2019 г.

ПОДХОДЫ К РЕШЕНИЮ ЗАДАЧ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ КОЭФФИЦИЕНТОВ МАССО- И ТЕПЛООБМЕНА ПРИ АППАРАТНОМ КУЛЬТИВИРОВАНИИ МИКРООРГАНИЗМОВ-БИОДЕСТРУКТОРОВ

APPROACHES TO SOLVING PROBLEMS OF DETERMINING THE COEFFICIENTS OF MASS AND HEAT TRANSFER IN THE HARDWARE CULTIVATION OF MICROOR- GANISMS-BIODESTRUCTORS

Ерофеевская Л. А.
Институт проблем нефти и газа СО РАН
Якутск, Россия

Аннотация. Изучены биологические свойства микроорганизмов, перспективных для биотехнологического применения в части обращения с отходами органического происхождения. Рассмотрены два варианта определения коэффициентов массо– и теплообмена при аэробном культивировании бактерий-биодеструкторов органических веществ. Показано, что при аппаратном культивировании для расчета указанных коэффициентов между микробной клеткой и однофазной жидкостью предпочтителен эмпирический метод; между микробной клеткой и газожидкостной смесью – полумпирический метод.

Abstract. The biological properties of microorganisms that are promising for biotechnological use in the management of organic waste have been studied. Two variants of determining the coefficients of mass and heat transfer in the aerobic cultivation of bacteria– biodestructors of organic substances are considered. It is shown that in hardware cultivation, the empirical method is preferred for calculating the specified coefficients between a microbial cell and a single – phase liquid; between a microbial cell and a gas-liquid mixture, the semi-empirical method is preferred.

В биотехнологической практике рост и накопление клеток микроорганизмов-биодеструкторов органических веществ при аппаратном культивировании представляет собой весьма многообразный физико-химический процесс, который подчиняется законам сохранения и превращения материи. В процессе жизнедеятельности в микробной клетке постоянно протекают реакции, в ходе которых происходит перераспределение жизненно важных органогенных элементов – кислорода, углерода, азота, водорода, серы и других элементов, из которых бактерии и грибы синтезируют сложные органические соединения (белки, углеводы, липоиды, витамины). Энергия, образующаяся при метаболизме клеток расходуется микроорганизмами в процессе их роста и размножения. Согласно закону сохранения материи, общее количество элементов, составляющих микробную клетку, должно соответствовать количеству элементов, усвоенных клеткой из питательного субстрата. При этом, объем веществ, подвергшихся биохимическим превращениям в клетке в процессе промежуточного обмена веществ или тепло, которое выделяется микроорганизмами в процессе роста или накопления биомассы клеток обычно соразмерно объёму веществ, усвоенных или выделенных клеткой в процессе метаболизма.

В процессе культивирования микроорганизмы постоянно выделяют тепло, связанное с их метаболизмом. При аппаратном культивировании наращивание биомассы

в жидкой среде протекает под влиянием сложных гидродинамических параметров. Перемешивающие устройства, встроенные в ферментёры во время работы аппарата создают условия для периодического доступа кислорода, поэтому теплообмен здесь протекает в трёхфазной системе (воздух–вода–клетка), при тесном взаимодействии компонентов участвующих в этом процессе. На этапе роста микробных клеток в жидкой среде могут возникать затруднения, связанные с перераспределением тепла и массы. Данная проблема обусловлена задачами, решение которых сводится в расчете показателей массо- и теплообмена. Анализ экспериментальных данных по определению коэффициентов массо- и теплообмена, имеющихся в открытых источниках показал, что в микробиологии это малоизученная тема. Некоторые авторы [3, 2] предлагают свести рассматриваемую проблему к решению трёх основных задач: теплообмена между твердой поверхностью и омывающим её потоком однофазной культуральной жидкостью или газожидкостной смеси: теплообмен между газом и жидкостью и теплообмен между газожидкостной смесью и клеткой. Эти задачи имеют много общего, так как интенсивность тепломассообменных процессов определяется, прежде всего, степенью турбулизации среды, зависящей от величины энергии, вводимой в среду извне [3]. Источниками турбулентности могут быть стенки аппаратов, мешалки, движение газа относительно жидкости и т. п. Для решения этих задач предлагаются три подхода: эмпирический, полуэмпирический и аналитический.

Эмпирический подход основан на получении экспериментальных данных, наблюдениях, теории подобия и размерностях, которые в совокупности обеспечивают возможность непосредственного наблюдения за процессом культивирования при наработке микробной биомассы. Тепловыделение в этом процессе является одним из значимых параметров, обусловленных термогенезом и механизмом работы перемешивающих устройств в аппаратах для культивирования микроорганизмов.

Аналитический подход основан на решении дифференциальных уравнений переноса импульса, теплоты и массы [3].

Полуэмпирический подход к определению коэффициента массо- и теплообмена базируется на физической модели процесса культивирования микробных клеток. Для математического описания данного процесса используется уравнение ламинарного пограничного слоя с распространением полученных решений на турбулентные течения с помощью моделей турбулентных пульсаций [1].

В процессе периодического культивирования можно произвести расчет потребления кислорода микробной культурой. При культивировании на углеродсодержащем субстрате для определения необходимого объема кислорода для полноценного роста и развития микроорганизмов эмпирическая зависимость выглядит в виде формулы:

$$V(O_2) = (A:C)-B, \quad (1)$$

где $V(O_2)$ – объём кислорода, потребляемого микроорганизмами из субстрата при культивировании (кг/кг);

A – объём кислорода, необходимого на окисление 1 кг субстрата до диоксида углерода и воды;

B – объём кислорода, необходимого на окисление 1 кг сухой биомассы до диоксида углерода и воды;

C – экономический коэффициент (коэффициенты выхода биомассы и продукта).

Таким образом, процесс культивирования микробных клеток всегда сопровождается выделением теплоты за счет биологических процессов, происходящих в системе «воздух–вода–клетка», поэтому необходимость в исследовании тепломассообмена между питательным субстратом и микробной клеткой и теплообмена между теплопередающей поверхностью аппаратов для культивирования и ферментации и культуральной средой очевидна и актуальна для биотехнологического производства.

Литература

1. Будтов В.П., Консетов В. В. Тепломассоперенос в полимеризационных процессах. – Л.: Химия, 1993. – 256 с.
2. Красных, В.Ю. Тепломассообмен. Основные формулы, задачи и способы их решения: сборник задач / В.Ю. Красных, В.Н. Королев. Екатеринбург: УрФУ, 2012. – 64 с.
3. Тишин В.Б. Культивирование микроорганизмов: кинетика, гидродинамика, тепломассообмен. – СПб., 2012. – С. 105-116.

ИЗМЕНЕНИЕ СТРУКТУРЫ И ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ СМЕРЗАЮЩИХСЯ ЗАСЫПОК КОЛОТОГО ЛЬДА

Заричняк Ю. П.¹, Горбунова А. Ю.¹, Иванов В. А.², Пилипенко Н. П.¹,
Коваленко А. Н.

¹ Национальный исследовательский университет информационных технологий,
механики и оптики
Санкт-Петербург, Россия

² Институт физико-технических проблем Севера им. В. П. Ларионова СО РАН
Якутск, Россия

³ Физико-технический институт РАН
Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. Рассмотрен процесс консолидации частиц колотого льда в свободных засыпках сопровождающийся уплотнением начальной структуры свободной засыпки (снижением общей пористости), увеличением фактического пятна контактирующих кусков льда и увеличением эффективной теплопроводности засыпки в процессе консолидации. Предложена методика расчёта (прогноза) изменения теплопроводности засыпки в процессе консолидации. Результаты расчётов согласуются с экспериментальными данными из независимых источников.

Abstract. The process of crushed ice particles consolidation in loose backfills is considered. It is accompanied by the compaction of the initial structure of the loose backfill (decrease in total porosity), an increase in the actual spot of contacting pieces of ice and an increase in the effective thermal conductivity of the backfill during the consolidation process. A method for calculating (forecasting) changes in the thermal conductivity of the backfill in the process of consolidation is proposed. The calculation results match the experimental data found in independent sources.

Засыпки колотого льда в районах Севера, где в естественных условиях в зимний период его легко можно заготовить часто используются для образования запасов хладагента в низкотемпературных хранилищах продовольствия, при ремонте повреждённых временных дорожных покрытий [1, 2]. В процессе использования свободных засыпок колотого льда происходит уплотнение начальной структуры свободной засыпки, сопровождающееся увеличением фактического пятна контактирующих кусков льда, снижением общей пористости и увеличением эффективной теплопроводности засыпки в процессе консолидации. Минимальный объём исходной информации для оценки относительного размера фактического пятна контакта частиц в процессе консолидации засыпки требует знания плотности монолита и текущего значения эффективной плотности засыпки.

Для более детального анализа влияния определяющих параметров на процесс консолидации и изменение эффективной теплопроводности необходимы данные о

средних размерах частиц, коэффициенте поверхностного натяжения, энергии активации, кинематической вязкости, напряжении пластической деформации и длительности хранения засыпок льда [3]. Знание необходимых данных позволяет оценить относительный размер пятна контакта $u_f = f(r, T, E_{акт}, t)$ и эффективную теплопроводность $\lambda_{эфф} = f(\lambda_{льда}, \rho_{льда}, \rho_{зас}, t)$. Результаты расчётов качественно и количественно согласуются с экспериментальными данными отечественных и зарубежных исследований в диапазоне изменения плотности консолидированных засыпок $300 < \rho_{зас} < 550 \text{ кг/м}^3$, пористости $0 < P < 0.7$ и времени выдержки t от 600 сек, 24 часа, до 30 суток.

Литература

1. Холодильно-технологический комплекс для предварительного охлаждения и временного хранения рыбы. <https://findpatent.ru/patent/258/2581668.html>. ©, 2012-2021
2. Способ замораживания трещины в ледовом покрытии включает наполнение ее гранулированным льдом с температурой от минус 2 до минус 5° С и ниже. <https://findpatent.ru/patent/258/2581668.html>, 2012-2021.
3. Сморгин Г.И. К определению теплопроводности рыхлого льда. ИФЖ, 1985, N 5, с.864-865.

АНАЛИТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОЙ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ УГЛЕРОДНЫХ КОЛОССАЛЬНЫХ МЕЗОТРУБОК

Заричняк Ю. П.¹, Горбунова А. Ю.¹, Иванов В. А.², Кораблев В. А.¹, Коваленко А. Н.

¹ Национальный исследовательский университет информационных технологий,
механики и оптики

Санкт-Петербург, Россия

² Институт физико-технических проблем Севера им. В. П. Ларионова СО РАН
Якутск, Россия

³ Физико-Технический Институт РАН
Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. В 2008 году учеными Китая и США была открыта ранее неизвестная форма углерода, названная «колоссальными» («гигантскими») мезо трубками, габариты которых на порядки выше размеров как одностенных, так и многостенных углеродных нанотрубок. Предложены модель структуры и методика аналитической оценки (прогноза) эффективной теплопроводности новой аллотропной формы углерода – колоссальных углеродных мезо трубок. Получены оценки продольной (осевой) и поперечной (трансверсальной) эффективной теплопроводности мезо трубок всего диапазона исследованных диаметров $40 < D < 120 \text{ мкм}$.

Abstract. In 2008, scientists from China and the United States discovered a previously unknown form of carbon called “colossal” (“giant”) meso tubes, the dimensions of which are orders of magnitude higher than the dimensions of both single-walled and multi-walled carbon nanotubes. A model of the structure and a method of analytical assessment (forecasting) of the effective thermal conductivity of a new allotropic form of carbon – colossal carbon meso tubes are proposed. Estimates of the longitudinal (axial) and transverse effective thermal conductivity of meso tubes for the entire range of investigated diameters of $40 < D < 120 \text{ }\mu\text{m}$ are obtained.

Предложены модель структуры и методика аналитической оценки эффективной теплопроводности новой аллотропной формы углерода – колоссальных углеродных мезо трубок. Получены оценки продольной (осевой) и поперечной (трансверсальной) эффективной теплопроводности мезо трубок разного диаметра.

В 2008 году в совместных исследованиях ученых Китая и США была открыта ранее неизвестная форма углерода, названная «колоссальными» («гигантскими») мезо

трубками, поперечные размеры которых ($40 < D < 120$ мкм, длина в сантиметровом диапазоне) на порядки выше размеров как одностенных, так и многостенных углеродных нанотрубок [1-3]. Колоссальная мезо трубка представляет собой коаксиальную структуру, наружная и внутренняя цилиндрические стенки которой соединены системой тонкостенных радиальных перегородок, протяженностью по всей длине трубки.

Из-за крайне малого числа экспериментальных данных по теплопроводности колоссальных углеродных мезо трубок в качестве приближенного метода аналитической оценки теплопроводности предлагается использовать метод Рэлея, заключающийся в вычислении теплопроводности с помощью моделей и методов теории обобщенной проводимости [3]. Модель структуры мезо трубки системой вспомогательных адиабатических и изотермических плоскостей разбивается на элементарные участки. Совокупность элементарных участков описывается схемой соединения их тепловых сопротивлений. Затем определяют эквивалентное тепловое сопротивление используя электротепловую аналогию, и далее определяется эффективная теплопроводность мезо трубки. Проведены расчёты продольной и поперечной теплопроводности углеродных колоссальных мезо трубок во всём диапазоне изменения диаметров

Полученные значения теплопроводности согласуются с экспериментом, заявленным в Патенте России № 2621102. Благодаря совокупности своих механических и тепловых свойств мезотрубки являются перспективным материалом для композитов, используемых в производстве как маломасштабных средств индивидуальной защиты (бронежилетов), так и крупных конструкций ветроэнергетики актуальных для северных территорий, и даже для использования в будущей мега конструкции – основного троса в одном из крупнейших проектов современности – космическом лифте.

Литература

1. Peng H., Chen D., Huang J. et al Strong and Ductile Colossal Carbon Tubes with Walls of Rectangular Macropores //Phys. Rev. Lett.: journal.— 2008.—Vol. 101,N. 14.—P. 145501.
2. Tang Y., Zhou L., Jiaxi Li, Huang J. et al, Giant Nanotubes Loaded with Artificial Peroxidase Centers: Self-Assembly of Supramolecular Amphiphiles as a Tool To Functionalize Nanotubes//Angewandte Chemie International Edition. 2010,V. 49, Issue 23, P. 3920–3924.
3. Мессерле В.Е., Устименко А. Б., Осадчая Э. Ф. Плазменная переработка топлив Колоссальные углеродные трубки. VIII Всероссийская конференция «Горение твердого топлива», Институт тепловых физики СО РАН, 2012. 13–16 ноября.

ПРОГНОЗ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА НАСЫПНЫХ ГРУНТОВ СКЛОНА С УЧЕТОМ РАБОТЫ СЕЗОННО-ОХЛАЖДАЮЩИХ УСТРОЙСТВ В УСЛОВИЯХ КРИОЛИТОЗОНЫ

Курилко А. С.¹, Попенко Ф. Е.², Хохолов Ю. А.¹, Романова Е. К.¹

¹ Институт горного дела Севера им. Н.В.Черского СО РАН

² Научно-внедренческий центр «Геотехнология»

г. Якутск, Россия

Аннотация. Работа посвящена промораживанию сезонно-охлаждающими устройствами талых насыпных грунтов склона, удерживаемых габионной стенкой в условиях криолитозоны. Для оценки эффективности искусственного замораживания грунтов склона разработана трехмерная математическая модель теплообменных процессов с учетом фазовых переходов влаги и динамики атмосферного воздуха. Численные расчеты показали эффективность использования сезонно-охлаждающих охлаждающих устройств для повышения устойчивости насыпного склона.

Ключевые слова: температурный режим, насыпные грунты, сезонно-охлаждающие охлаждающие устройства, математическая модель, теплообмен, криолитозона, задача Стефана, габионная стенка.

Abstract. The work is devoted to the freezing of thawed bulk soils of a slope held by a gabion wall in a cryolithozone with seasonal cooling devices. To assess the effectiveness of artificial freezing of slope soils, a three-dimensional mathematical model of heat exchange processes has been developed, taking into account the phase transitions of moisture and the dynamics of atmospheric air. Numerical calculations have shown the effectiveness of using seasonal cooling devices to increase the stability of the bulk slope.

Key words: Temperature regime, fill soils, seasonal cooling devices, mathematical model, heat exchange, permafrost zone, Stefan's problem, gabion wall.

Для укрепления склона из насыпных талых грунтов (район долины р.Омчак Магаданской области) применены подпорные стены из габионных конструкций, которые предотвращают сползание грунтовых массивов и тем самым обеспечивают устойчивость склона. После отсыпки в теплое время года насыпных грунтов склона в нем образуется обширная талая зона. Расчет устойчивости габионных подпорных стен показал, что обеспечить их устойчивость при эксплуатации и возможном развитии геокриологических и геомеханических процессов в грунте весьма проблематично без применения специальных технических мероприятий, обеспечивающих сохранение прочностных и деформационных свойств грунта. Наиболее перспективным методом обеспечения устойчивости насыпных грунтов в условиях криолитозоны является промораживание насыпного грунта сезонно-охлаждающими устройствами (СОУ).

Для разработки метода управления температурным режимом грунтов склона закрепленного габионной подпорной стенкой и обеспечения их устойчивости разработана трехмерная математическая модель процессов теплообмена с учетом фазовых переходов влаги, длины охлаждающих устройств, их количества и места расположения, годового хода температуры атмосферного воздуха, слоистости грунтов.

Расчеты показали эффективность использования СОУ на повышение устойчивости насыпного склона путем замораживания. Уже в первый год промораживания грунтов с применением СОУ в массиве насыпных грунтов склона образуется зона отрицательных температур. Талая зона в насыпном склоне постепенно сокращается и после четвертого года эксплуатации СОУ полностью исчезает, температура грунтов снижается до -6°C , что косвенно свидетельствует о их высоких прочностных характеристиках.

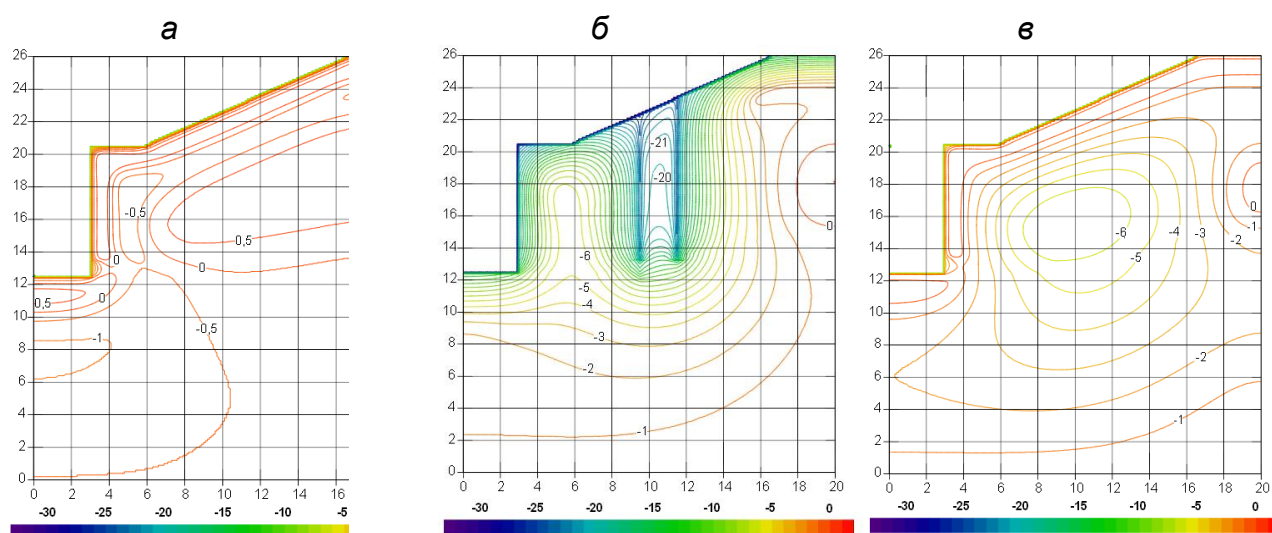


Рис. 1. – Температурные изолинии в районе подпорной габионной стенки в середине октября перед началом работы СОУ (а), в середине января (б) и октября (в) в четвертый год эксплуатации СОУ.

Расчеты показывают, что после 4 лет работы СОУ они могут быть отключены. Температурный режим грунтов склона при этом близок к естественному тепловому

режиму мерзлых грунтов региона. Склон становится абсолютно устойчивым. Возможны только лишь явления поверхностных деформаций связанные с сезонным замерзанием-оттаиванием грунтов.

АВТОНОМНЫЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫЕ КОМПЛЕКСЫ НА СЫРОЙ НЕФТИ ДЛЯ РАБОТЫ В АРКТИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ

Росляков П. В.¹, Проскурин Ю. В.², Гриша Б. Г.², Ионкин И. Л.¹

¹ Национальный исследовательский университет «МЭИ»

Москва, Россия

² ПАО «Транснефть»

Москва, Россия

Аннотация. Работа посвящена решению научных и технических задач по созданию российского теплоэнергетического оборудования нового поколения на основе комплексных расчетно-теоретических и экспериментальных исследований влияния аэродинамических и тепломассообменных процессов на воспламенение и горение сырой нефти в стесненных условиях жаровых труб водогрейных котлов. По результатам исследований выполнены конструкторские разработки, изготовлены и успешно прошли испытания опытные образцы жаротрубного водогрейного котла с выносным экономайзером и автоматизированного малоэмиссионного горелочного устройства. Подтверждены КПД котла более 94% и пониженный уровень выбросов загрязняющих веществ в рабочем диапазоне нагрузок.

Abstract. The work is devoted to solving scientific and technical problems in the development of Russian power equipment of new generation based on integrated theoretical and experimental studies of the effect of aerodynamic and heat-mass exchange processes on the ignition and combustion of crude oil in the straitened conditions of fire-tube boilers. Based on the results of the research, design developments were carried out, prototypes of a fire-tube hot-water boiler with a remote economizer and an automated low-emission burner device were manufactured and successfully tested. The efficiency of the boiler is more than 94% and the reduced level of pollutants emissions in the operating load range is confirmed.

Создание высокоэффективных автономных комплексов в составе блочно-модульных котельных (БМК), работающих на сырой нефти, является важной задачей эффективного теплоснабжения промышленных объектов и населенных пунктов в труднодоступных районах Крайнего Севера и Арктики, испытывающих дефицит традиционных энергетических топлив. Такие комплексы должны включать водогрейные котлы мощностью 1-3 МВт с КПД не менее 94%, сжигающие неподготовленную сырую нефть в малоэмиссионных горелочных устройствах с пониженным выходом оксидов азота NO_x и монооксида углерода СО.

Для решения задач обеспечения высокого КПД и эффективной защиты котла от низкотемпературной сернистой коррозии в ограниченных габаритных размерах БМК в данной работе впервые для котлов, использующих в качестве топлива сырую нефть, было предложено применение предвключенного (по воде) выносного экономайзера, устанавливаемого над котлом. Выполненные инвариантные теплогидравлические расчеты в программном комплексе Boiler Designer позволили оптимизировать схемы компоновки, конструкции котла и выносного экономайзера и размеры их элементов для размещения в ограниченных габаритах БМК и снизить сопротивления газовоздушного и водяного трактов [1].

В основу предложенной конструкции малоэмиссионного горелочного устройства был положен принцип стадийно-ступенчатого сжигания топлива, который заключался в организации дополнительных воздушных потоков в различные зоны горения топлива для улучшения условий его выгорания и снижения эмиссии оксидов азота. Для

оптимизации конструкции были разработаны компьютерные модели различных вариантов горелочных устройств и проведены численные эксперименты с использованием CFD-методов по исследованию процессов воспламенения, выгорания топлива и эмиссии оксидов азота и оксида углерода в зависимости от конструктивных и режимных параметров. Выявлены и детально исследованы основные закономерности физико-химических и тепломассообменных процессов при сжигании сырой нефти в мало изученных специфических стесненных топочных условиях жаротрубных котлов малой мощности и определено влияние нагрузки котла на его рабочие и технико-экономические характеристики [2].

По результатам проведенных исследований были разработаны, созданы и испытаны новый жаротрубный котел с выносным экономайзером (рис. 1) для размещения в БМК и новое комбинированное малоэмиссионное горелочное устройство (рис. 2), которые имеют ряд преимуществ по сравнению с зарубежными аналогами. Результаты испытаний подтвердили работу котла с КПД выше 94 % во всем диапазоне нагрузок, которые составили от 36 до 125% от номинальной нагрузки. Концентрации оксидов азота и СО в уходящих газах не превышают установленные нормативные уровни и на 10-15% ниже, чем у зарубежных аналогов. Эксплуатационные и экологические характеристики разработанных котлов и горелочных устройств подтверждены сертификационными испытаниями на соответствие Техническим регламентам Таможенного союза.

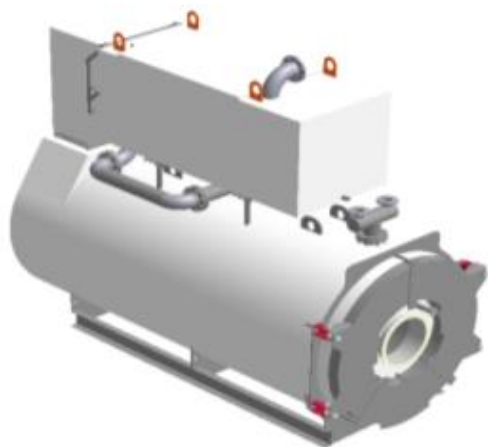


Рис. 1 – 3D-модель энергоэффективного котла с выносным экономайзером

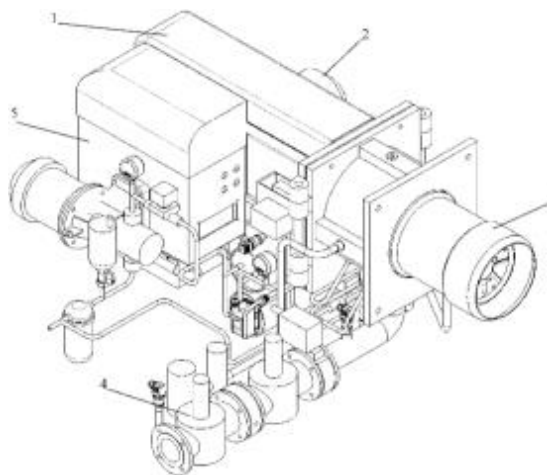


Рис. 2 – Сборочный чертеж горелочного устройства

Использование разработанного теплоэнергетического оборудования позволяет сократить стоимость вырабатываемой тепловой энергии, повысить экологическую безопасность и обеспечить надежность теплоснабжения. Котлы и горелки поставляются на объекты в готовом виде в составе компактных БМК, что существенно снижает сроки их ввода в эксплуатацию.

На дочерних предприятиях ПАО «Транснефть» освоено серийное производство предложенных энергоэффективных малогабаритных котлов и комбинированных малоэмиссионных горелочных устройств, разработанных с применением инновационных конструкторских и технологических решений.

Литература

1. Технические решения для малогабаритного водогрейного котла /П.В. Росляков, Ю.В. Проскурин, К. А. Плешанов, И.Л. Ионкин // Промышленная энергетика. 2017. № 8. С. 44–51..
2. The effect of the structure of the vortex burner for combustion processes in limited volumes/P. V. Roslyakov, M. N. Zaichenko, D. A. Khokhlov and Y. V. Proskurin// Heat and Mass Transfer and Hydrodynamics in Swirling Flows (HMTHSF-2019). AIP Conference Proceedings 2211, 040001 (2020). <https://doi.org/10.1063/5.0000782>.

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОВОГО СОСТОЯНИЯ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОМ НАГРЕВЕ В СВЧ-ДИАПАЗОНЕ

Семенов С. О.^{1, 2}, Саввинова Н. А.², Андреев А. С.

¹ Федеральный исследовательский центр «Якутский научный центр СО РАН»
Якутск, Россия

² Северо-Восточный федеральный университет им. М. К. Аммосова
Якутск, Россия

³ Институт физико-технических проблем Севера им. В. П. Ларионова СО РАН
Якутск, Россия

Аннотация. Разработан лабораторный стенд для проведения СВЧ излучения на строительные материалы, это красный и огнеупорный кирпич. Исследовано влияние микроволнового излучения на частоте 2. ГГц с мощностью начиная с 200 до 1000 Вт на теплофизические свойства строительных материалов. Все температурные, геометрические данные были получены откалиброванными датчиками. Были получены теплофизические свойства образцов нестационарным режимом импульсными излучения микроволнового излучения и проведена тарировка результатов с существующими приборами в стационарном режиме.

Ключевые слова: микроволновое излучение, температурное поле, теплофизические свойства материалов, диаграмма направленности.

Abstract. A laboratory stand has been developed for conducting microwave radiation on building materials, these are red and refractory bricks. The effect of microwave radiation at a frequency of 2. GHz with a power ranging from 200 to 1000 W on the thermophysical properties of building materials has been investigated. All temperature, geometric data were obtained by calibrated sensors. The thermophysical properties of the samples were obtained by a nonstationary mode of pulsed microwave radiation, and the results were calibrated with existing devices in a stationary mode.

Keywords: microwave radiation, temperature field, thermophysical properties of materials, directional diagram.

В мире в области теплофизики и теплотехники, стоит актуальная проблема по определению и оценки теплофизических свойств (ТФС) твердых материалов без разрушения и нарушения целостности исследуемого объекта [1]. Исследователям в области теплофизики, который занимаются над улучшением ТФС материалов и при определении коэффициентов теплопроводности, температуропроводности, появляются затруднения и необходимость подготовки образцов (квадрат, куб), как известно это процесс трудоемкий, если учитывать, что все материалы различаются по механическим свойствам, твердостью, упругостью. Строительные организации, также учитывают соответствия ТФС материалов с соответствующими нормативами.

Проведен обзор научных работ по влиянию СВЧ-излучений на ТФС твердых материалов. На основе ранее проведенных работ по определению ТФС бесконтактным методом [2, 3], для данного эксперимента выбран нестационарный режим и метод мгновенного излучения для определения теплофизических свойств материалов.

В данной работе представлены результаты исследования влияния СВЧ излучения на строительные материалы и разработка стенда для проведения экспериментальных работ и определения ТФС нестационарным методом с СВЧ нагревом, также представлены основные результаты исследования температурного поля на образцах (красный и огнеупорный кирпич).

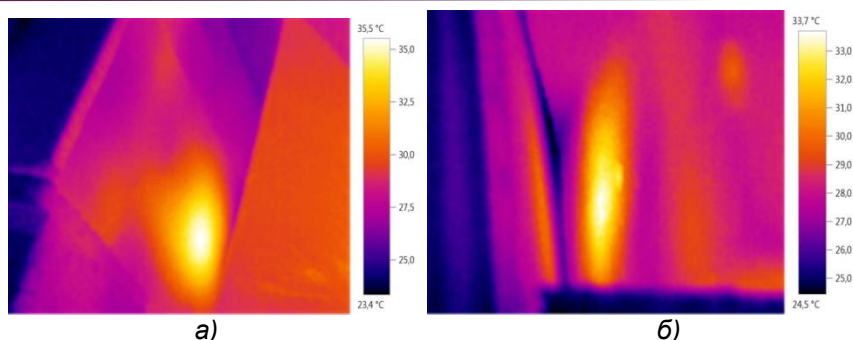


Рис. 1. Эксперимент на расстоянии от 8 до 10 см. в закрытом стенде при 700 Вт с длительностью излучения 1 мин. для огнеупорного кирпича, где, а) открытая сторона образца, б) противоположная сторона.

На рисунках 1 и 2 показаны фрагменты результатов СВЧ излучения, в итоге исходя из наблюдений, можно сказать, что излучение нагревает точно при определенных дистанциях в зависимости от диаграммы направленности излучения. Благодаря расчету диаграммы направленности определена расстояние L , при котором определялись теплофизические свойства материалов по контролируемым координатам x_1 и x_2 , где эти координаты фиксировали с помощью датчиков.

Литература

1. Чернышов В.Н., Однолько В.Г., Чернышов А. В. Методы и системы неразрушающего контроля теплозащитных свойств строительных материалов и изделий. – М.: Издательский дом "Спектр", 2012. – 200 с. – 400 экз. ISBN 978-5-4442-0015-5;
2. Методы определения теплопроводности и температуропроводности. Под ред. А. В. Лыкова. М., «Энергия», 1973.;
3. Теплофизические измерения: Учебное пособие /Под ред. Е. С. Платунова. – СПб.: СПбГУН, 2010. – 738 с.

ENERGOENVIRONMENTAL WORLD TENDENCES AND PRIORITIES IN DEVELOPMENT OF HEAT AND REFRIGERATION TECHNOLOGIES THAT IMPROVE QUALITY OF LIFE

D. Sc. O. B. Tsvetkov¹, Ph. D. Yu. A. Laptev²,
Ph. D. V. V. Mitropov³, D. Sc. A. V. Sharkov⁴

¹ tsvetkov@itmo.ru, ² laptev_yua@mail.ru, ³ v_mit@mail.ru, ⁴ avsharkov@itmo.ru
ITMO University

Abstract. The low temperature engineering is absolutely necessary for life. Very important role in the refrigeration are playing the refrigerants. There are three very popularizes in modern refrigeration categories of working fluids: chlorofluorocarbons (CFC), hydrochlorofluorocarbons (HCFC) and hydrofluorocarbons (HFC). Special consideration is paid to the new generation of refrigerants – hydrochlorofluoroolefins (HCFO). The HCFOs are recommended as alternatives of CFCs, HCFCs and HFCs after 2036 year for the low temperature engineering from global environmental problems.

Keywords: refrigerants, halocarbons, haloolefins, global warming potential, GWP.

The ozone depletion in the stratosphere and global warming due to greenhouse effect are global environmental problems. The urgent task for the humanity is to rule out these global challenges by eliminating any doubtful causes.

The low temperature engineering is present in most past, present and future areas of human activity and is absolutely necessary for life. The refrigeration today accounts for

nearly 20–25 % of the world's electricity. It is an absolute necessity for human health maintaining food or health products (medicines, vaccines, preventing for example in view of Covid-19 pandemic) at an appropriate temperature, preventing bacterial desenses and deaths. Air conditioning is a necessity for maintain good health or even survival in hot climates or during heat waves as the situation at 2021 year.

The refrigeration technologies are increasingly used to produce energy. For producing heat and cold for air conditioning are designed the heat pumps with a coefficient of performance greater than 3. In this case heat pumps can be considered as a renewable energy. As an energy of the future is presented the liquefied hydrogen and liquefied natural gas in our days already accounts for more than 10 % of the world gas consumption.

Very important role in the refrigeration are playing the working fluids of low temperature engineering – the refrigerants [1]. The direct emissions (leakage) of fluorinated refrigerants are responsible for 7,8 % of global greenhouse gas emissions [2]. These emissions are growing because of growing needs for refrigeration. The first fluorinated refrigerant (CF_2Cl_2) was synthesized in the 1928 and fluorocarbons CFCs, CBrFCs, HCFCs and HFCs about completely replaced ammonia, carbon dioxide and hydrocarbons in refrigeration. In 1987 the Montreal Protocol [1, 3] asked all countries for reduction in the consumption and production of fluorochlorocarbons (CFCs), hydrofluorocarbons (HCFCs) and halons. The developed countries phased out the use of CFCs by January 1996 and HCFCs refrigerant are phased out by January 2020.

The decision to phase out of CFCs and HCFCs working fluids affected the refrigeration and AC-industry to promote environmentally safer technologies, new safer alternatives not depleting ozone layer in the stratosphere [4]. Ozone layer – safe products (HFC substances) such as HFC-134a, HFC-125, HFC-32, HFC-152a, HFC-143a (see Table 1) and their blends are most commercially used in modern refrigeration. HFC substances are not ozone depleting, but potent greenhouse gases.

Table 1

Ozone layer – safe HFC substances

ASHRAE designation	Structure	t_0 , °C	t_{cr} , °C	GWP
R23	CHF_3	-82,1	25,9	12000
R32	CH_2F_2	-51,7	78,2	550
R125	$\text{CHF}_2\text{-CF}_3$	-48,1	66,2	3400
R143a	$\text{CH}_3\text{-CF}_3$	-47,2	72,9	4300
R161	$\text{CH}_3\text{-CH}_2\text{F}$	-37,1	102,2	12
R218	C_3F_8	-36,6	71,9	8600
R134a	$\text{CH}_2\text{F-CF}_3$	-26,1	101,1	1300
R152a	$\text{CH}_3\text{-CHF}_2$	-24,0	113,3	120
R134	$\text{CHF}_2\text{-CHF}_2$	-23,0	119,0	1200
R1311	CF_3I	-22,5	122,0	1
R227ea	$\text{CF}_3\text{-CHF-CF}_3$	-15,6	102,8	3500
R236fa	$\text{CF}_3\text{-CH}_2\text{-CF}_3$	-1,4	124,9	9400
R143	$\text{CH}_2\text{F-CHF}_2$	5,0	156,7	300
R245fa	$\text{CHF}_2\text{-CHF-CHF}_2$	15,1	154,1	950

t_0 – temperature of boiling point at normal pressure,

t_{cr} – critical temperature.

Concerns about the environmental impact of refrigeration, heat pumps, organic Rankin cycle and air conditioning systems have led to an interest in ozone-friendly refrigerants with low global warming potential (GWP) [5]. For these reasons very popular blends R507 and R404A having substantial GWP of about 3800 for R507 and 3520 for R404A cannot pretend to be in refrigeration after 2036 year. The necessity of applying low – GWP refrigerants with high energy efficiency is emphasized in Kyoto Protocol (1997) and in Kigali

amendment (2016) [6]. Conversion of refrigeration from HFCs to low GWP refrigerant may take until 2031-2036 to be completed [7].

Energy efficiency and life cycle performance of the low temperature system and safety issues are to be taken into account when choosing a low GWP refrigerants. The refrigeration industry carry out extensive researches to find highly efficient alternative refrigerants with zero ozone depletion potential (ODP) and GWP lower than 150. As a result hydrofluoroolefins (HFOs) and hydrochlorofluoroolefins (HCFOs) that have zero ODP, low GWP and extremely short atmospheric lifetime have been proposed as alternative for very used govern refrigerants in refrigeration and in mobile air conditioning R134a which has a GWP of 1430 and R125 which has a GWP of 1760. Both HFOs and HCFOs have an ODP value at zero and GWP value less of 10, low toxicity and mild flammability. Hydrofluoroolefins (HFOs) and hydrochlorofluoroolefins (HCFOs) are unsaturated short – chain haloolefins [8]. Table 2 lists some HFOs together with some of their fundamental properties. HCFOs contain one chlorine atom in their molecule. Like HFCs some of hydrofluorochloroolefins can be used as refrigerants. The carbon-carbon double bond makes HFOs and HCFOs less stable in the atmosphere than their HFC counterparts.

Table 2

ASHRAE designation and select properties of several hydrofluoroolefins(HFOs)

ASHRAE designation	Structure	GWP	T_{cr} , K	Comments
R1114	$CF_2=CF_2$	6	308,4	toxic
R1132a	$CF_2=CH_2$	<1	324,2	toxic
R1141	$CHF=CH_2$	<1	327,1	retain
R1123	$CF_2=CHF$	3	343,0	commercialized
R1216	$CF_2=CF-CF_3$	9	359,0	toxic
R1234yf	$CH_2=CF-CF_3$	<1	367,9	commercialized
R1234zf	$CH_2=CH-CF_3$	<1	376,9	retain
R1252ye(E)	$CHF=CF-CH_2$	2	380,7	retain
R1234ze(E)	$CHF=CH-CF_3$	<1	382,5	commercialized

HFOs can as HFCs decompose to form hydrogen fluoride HF or carbon difluoride (COF_2). Formation of HF occurs as a result of decomposition of an HFO or an HFC and depends on temperature, nature of combustion, humidity and the specific refrigerant. The HFOs are flammable. Medium pressure HFOs such as commercialized R1234yf, and R1234ze(E) classified as 2L refrigerants (lower flammability). HFOs such as R1336mzz(Z) and the commercialized HCFOs R1233zd(E) and R1224yd(Z) are class 1 (not flammable) refrigerants.

Choosing a low – GWP working fluid is the most frequently discussed solution. It is necessary on a mid-term perspective to use HFOs in low GWP blends together with traditional HFCs in refrigeration, air conditioning and heat pumps transport refrigeration application proposed as alternatives to R22, R134a, R404A and R410A. For example the R134a and R125 alternatives as R134a+R32+R1234ze(E), R134a+R32+R744+R1234ze(E), R134a+R32+R1234yf, R125+R32+R1234yf+R1234ze(E) can be used in stationary refrigeration systems and in multipack centralized refrigeration systems in cascade systems.

CONCLUSION

A complete phase down of HFC until 2031–2036 take important place right now in the world. Key elements to be taken into account when choosing HFOs and HCFOs refrigerants: energy efficiency and life cycle performance and safety issues since most low GWP refrigerants are mildly flammable and even toxic.

Referencies

1. Tsvetkov O.B. Refrigerants. – St. Petersburg, 2004. – p. 216.
2. Activity Report 2020, IIR, IIF, Paris
3. United Nations Environment Program (UNEP), 1997 Montreal Protocol on Substances that Deplete the ozone Layer, Final Act, United Nations, New York.
4. Nielsen O.J., Javadi M.S., Sulback Andersen M.P., Hurley M.D., Wallington T.J., Singh R. 2007, Atmospheric chemistry of $\text{CF}_3\text{CF}=\text{CH}_2$: kinetic and mechanisms of gas phase reactions with Cl atoms, OH radicals and O_3 .// Chem, Phys, Lett, 443, 18-22.
5. Protocol, Kyoto, 1997. Report of the Conference of the Parties. United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC).
6. UNEP, The Kigali Amendment (2016).
7. Regulation (EU) No 517/2014 of the European Parliament and the Council of 16 April 2014 on fluorinated greenhouse gases and repealing Regulation (EC) No 842/2006. Off. J. Eur. Union, 2014.
8. Akasaka R. Thermodynamic property models for the R32+R1234ze(E)+R1234yf – mixtures// Fluid Phase Equilib., 2013, 358, 98-104.

ИЗМЕРЕНИЕ ВЫСОКОИНТЕНСИВНЫХ ТЕПЛОВЫХ ПОТОКОВ В УСЛОВИЯХ АРКТИЧЕСКОГО КЛИМАТА

Шарков А. В.¹, Кораблев В. А.¹, Некрасов А. С.²

¹СПБГУ ИТМО, ²СПБ УГПС МЧС России

Санкт-Петербург, Российская Федерация

Аннотация. Представлена конструкция датчика теплового потока, обеспечивающая возможность эксплуатации при низких температурах и снижение времени измерения при испытаниях боевой одежды пожарного на стойкость тепловому потоку в условиях намокания и изменения температуры окружающей среды.

Интенсивное развитие Арктики в Российской Федерации и мире в последние годы обусловлено богатством природных ресурсов региона и растущей необходимостью осваивать новые месторождения. Поскольку 20 % мировых запасов газа сосредоточено в Арктической зоне РФ [1], то вполне естественным выглядит интенсификация добычи углеводородов и развитие транспортной инфраструктуры на фоне изменений климата, способствующих освоению северной территории, увеличение объема перевозок по СМП [2].

Развитие транспортной и добывающей инфраструктуры региона неразрывно связано с ростом рисков техногенных катастроф, в частности пожаров, на объектах добычи и транспортировки нефти и газа. Однако, изменения климата в АЗРФ хоть и облегчают добычу, но не делают эту территорию благоприятной для жизни и работы человека, поэтому развитию технологий добычи должно соответствовать развитие технологии защиты человека при выполнении боевых задач по тушению пожаров. Существующие нормы [3] предельно кратко описывают особенности боевой одежды пожарного, предназначенной для работы в условиях Арктики и не обеспечивают полноценного покрытия всех потребностей, возникающих при работе в условиях пожара. Одним из критериев, по которым испытывают боевую одежду пожарного, является защита от воздействия теплового потока вплоть до 50 кВт/м^2 и выше. Испытания в соответствии со стандартом предполагают статические измерения без приближения к реальным условиям эксплуатации, таким как намокание, циклическое промерзание и оттаивание одежды. Для перспективных испытаний, предполагающих оценку защиты боевой одежды пожарного от воздействия теплового потока в условиях воздействия воды и низких температур, необходимо разработать комплекс измерительных устройств, изготовленных во всеклиматическом исполнении.

Одним из факторов, не позволяющим использовать существующие решения, является использование жидкостного охлаждения в измерительных системах, в частности, в датчиках теплового потока и их инерционность, не позволяющая проводить испытания с изменяющимися во времени параметрами. Таким образом, возникает задача разработки, производства и калибровки малоинерционного датчика теплового потока, работа которого не требовала бы подключения жидкостной системы охлаждения.

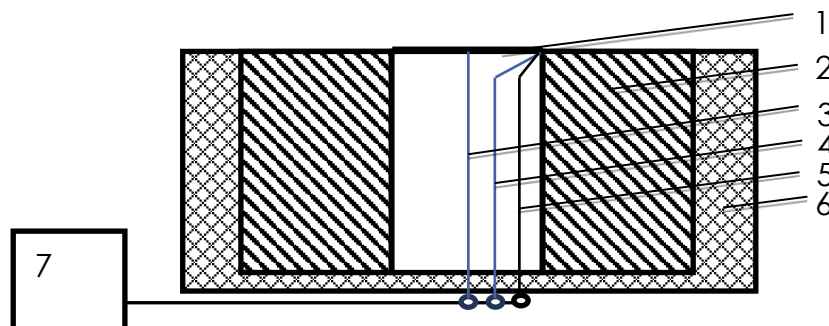


Рис. 1. Схема датчика теплового потока: 1 – чувствительный элемент, 2 – теплоемкое ядро, 3, 4 – константановые провода, 5 – хромелевый провод, 6 – тепловая изоляция, 7 – анализирующий блок

В качестве чувствительного элемента был выбран диск 1 из хромелевой фольги, а два константановых провода 3, 4, приваренных к центру и периферии диска обеспечивают возможность измерения перепада температур по радиусу диска на основании ТЭДС между ними. Для работы датчика по схеме Гардона необходимо обеспечить охлаждение периферии чувствительного элемента. Существующие промышленно изготавливаемые образцы датчиков Гардона охлаждаются жидкостью, что обеспечивает возможность длительной работы, но может негативно сказываться на точности измерений в условиях высоких или низких температур и давлений. Поэтому для охлаждения периферии была выбрана емкостная схема с помощью массивного металлического ядра 2. Массивное металлическое ядро защищено от температурного воздействия окружающей среды теплоизоляцией 6. Для контроля температуры датчика к периферии чувствительного элемента в точке монтажа константанового провода приварен дополнительный провод 5 из хромеля. Все параметры разрабатываемого датчика выбирались таким образом, чтобы переходная функция зависимости ТЭДС от времени соответствовала переходной функции инерционного звена первого порядка для уменьшения времени измерения. Все выводы с датчика подключены к анализирующему блоку 7.

После проведения калибровочных испытаний установлено, что зависимость ТЭДС от времени с достоверностью 0,97 описывается уравнением:

$$\Delta E = kq(\tau) \left(1 - e^{-\frac{\tau}{T}}\right) \quad (1)$$

Таким образом, экспериментально подтверждено, что датчик является инерционным звеном первого порядка, что позволяет определять значение ТЭДС еще до наступления стационарного режима в чувствительном элементе по зависимости:

$$\Delta E = \frac{d\Delta E}{d\tau}(\tau_0) \cdot T + \Delta E(\tau_0) \quad (2)$$

где ΔE – ТЭДС между константановыми проводами в момент установления стационарного режима, $\frac{d\Delta E}{d\tau}(\tau_0)$ – значение производной функции кривой разгона в точке τ_0 , T – константа звена, определяема калибровочными испытаниями, $\Delta E(\tau_0)$ – ТЭДС между константановыми проводами в момент измерения τ_0 до установления стационарного режима.

Проверочные испытания показали, что использование датчика конструкции, представленной на рис. 1., обеспечивает возможность проведения испытаний при отрицательных температурах и снизить время определения теплового потока с погрешностью не более 5 % в пять раз при использовании зависимости (2).

Литература

1. Щеголькова А. А., Ульченко М. В. Воспроизводство запасов природного газа в Российской Арктике: экономический аспект // Известия СПбГЭУ. 2018. №5 (113).
2. УКАЗ ПРЕЗИДЕНТА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ О Стратегии развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности на период до 2035 года
3. ГОСТ Р 53264-2019 НАЦИОНАЛЬНЫЙ СТАНДАРТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ. Техника пожарная. ОДЕЖДА ПОЖАРНОГО СПЕЦИАЛЬНАЯ ЗАЩИТНАЯ. Общие технические требования. Методы испытаний.
4. ГОСТ 15150-69 МЕЖГОСУДАРСТВЕННЫЙ СТАНДАРТ. МАШИНЫ, ПРИБОРЫ И ДРУГИЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ ИЗДЕЛИЯ. Исполнения для различных климатических районов. Категории, условия эксплуатации, хранения и транспортирования в части воздействия климатических факторов внешней среды.

ОПТИМИЗАЦИЯ КОНСТРУКЦИИ ЦОКОЛЬНОЙ ЧАСТИ ЗДАНИЙ, РАЗМЕЩЕННЫХ НА МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ГРУНТАХ

Мордовской С. Д., Данилов Н. Д., Третьяков Э. С., Шадрин В. Ю., Павлов Н. Н.
Северо-Восточный федеральный университет
г. Якутск, Россия

Аннотация. С применением разработанной программы расчета теплового взаимодействия здания с многолетнемерзлыми грунтами проведены расчеты при различных вариантах высоты подполья и толщин теплоизоляции в цокольном перекрытии и стенках подполья. Проведена экономическая оценка вариантов.

Abstract. In this article, an attempt has been made to substantiate the construction of buildings on permafrost soils with basements with insulated walls. Calculations were carried out using the developed program for calculating the thermal interaction of a building with permafrost soils. The calculations have shown that with a certain ratio of thicknesses of the basement walls and the basement floor insulation, it is possible to exclude not only the formation of a soil thawing, but also to achieve positive economic effect.

В условиях вечной мерзлоты индустрия строительства практикует возведение зданий с холодными и проветриваемыми подпольями. В то же время, традиционный способ строительства жилья из древесины предусматривает наличие подполья с утеплением не только цокольного перекрытия, но и стенок подполья. Исследования советских ученых показывают, что эту практику можно применять и при строительстве современных зданий.

Опираясь на результатах исследований [1, 2, 3, 4], приняли решение попытаться обосновать возможность строительства зданий на вечноммерзлых грунтах с подпольями с теплоизолированными стенками. Авторами разработана пространственная математическая модель теплового взаимодействия зданий с вечноммерзлыми грунтами, учитывающая не только теплообмен через цокольное перекрытие, но и теплообмен с наружным воздухом через стенки подполья. Составлена программа расчета теплового баланса теплового подполья, учитывающая среднемесячные значения всех элементов климата, термические сопротивления ограждений подполья и теплофизические параметры грунтов основания. Проведены расчеты для конкретного здания. Расчеты показали, что при определенном соотношении толщин теплоизоляции стенок подполья и цокольного перекрытия можно исключить не только образование чаши оттаивания, но и добиться экономического эффекта.

Проведен экономический анализ различных вариантов: при наличии проветриваемого подполья; при утеплении стенок подполья (варьировалась и высота подполья (0,6м; 0,8м; 1,0м)). При выборе толщин теплоизоляции в ограждениях ставились два условия: 1) плотность теплового потока через цокольное перекрытие не должна превышать значение, которое получается по требованиям свода правил при наличии проветриваемого подполья; 2) чаша оттаивания не должна достигать зоны деятельного слоя.

Литература

1. Данилов, Н.Д. Обоснование возможности возведения зданий на многолетнемерзлых грунтах с теплоэффективным решением цокольной части / Н. Данилов, С. Мордовской, Е. Петров, В. Шадрин // Актуальные проблемы строительного и жилищно – коммунального комплексов Республики Саха (Якутия): материалы Респ. науч. – техн.конф. – Якутск: Изд – во ЯГУ, 2004. – С.92 – 97.
2. Мордовской С.Д. Математическое моделирование пространственной задачи теплового взаимодействия зданий с теплыми подпольями с вечноммерзлыми грунтами / С. Мордовской, Н. Данилов, Н. Павлов, В. Шадрин // Современные проблемы строительства и жизнеобеспечения: безопасность, качество, энерго- и ресурсосбережение: материалы I Всеросс. Науч.-практич. конф. – Якутск: Изд-во ЯГУ. 2008. – С.179-186.
3. Kornilov, T. On the Experience of Constructing A Vented Under-Floor Space with Heat-Insulated Fences Under the Buildings of The Lightweight Steel-Framed Constructions on Permafrost Soils [Электронный ресурс]/T. Kornilov, A. Nikiforov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering – 2018. – №463 – Режим доступа: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/463/3/032017>
4. Корнилов Т.А. Мониторинг состояния многолетнемерзлых грунтов основания малоэтажных зданий с непрветриваемыми подпольями / Т.А. Корнилов А. Я. Никифоров, М. В. Рабинович // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 2020 – №4 – С. 27-32.

К ВОПРОСУ О ВЛИЯНИИ ФОРМЫ ПОЛОСТИ НОСА НА ВОЗДУХООБМЕН ПРИ ДЫХАНИИ В УСЛОВИЯХ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУР

Лукьянов Г. Н.¹, Рассадина А. А.¹, Неронов Р. В.²

¹ Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»

² Клиника «Современные медицинские технологии в Санкт-Петербурге»

г. Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. Представлены результаты многолетних исследований воздухообмена при дыхании, включающие экспериментальные исследования, диагностику и моделирование. Выявлено, что форма полости носа влияет на гидродинамику и теплообмен в органах дыхания, что может проявляться предрасположенностью к заболеваниям органов дыхания у носителей платикавитальной формы полости носа в экстремальных природных условиях Арктики. Показано, что для диагностики респираторных заболеваний необходим анализ динамических параметров.

Дыхание относится к наиболее значимым физиологическим процессам, обеспечивающим жизнедеятельность человека. По данным медицинской статистики доля заболеваний органов дыхания составляет 41 % от общего количества регистрируемых заболеваний за год [1]. Одна из функций дыхания заключается в прогреве воздуха в полости носа до температуры тела человека. В случае если воздух не успевает согреться до необходимой температуры, появление простудных заболеваний неизбежно. Ранее было установлено, что коэффициент теплоотдачи α в преддверии носа у здорового человека достигает величину $0,00001 \text{ Вт/м}^2\text{К}$ [2]. Такое высокое значение коэффициента теплоотдачи получается за счет сложной структуры поверхности носовых ходов и приводит к тому, что воздух в процессе движения по дыхательной системе перед попаданием в легкие успевает прогреться или охладиться до температуры тела человека.

Ранее проведенные исследования в области оториноларингологии позволили выделить эволюционное формирование трех типов формы полости носа – лепто- (узкий нос), мезо- (средний нос) и плати-типы (широкий нос) [3, 4]. Условно эти типы формы полости носа относятся к монголоидной (средний нос), негроидно-австралоидной (широкий нос) и европеоидной (узкий нос) расам (классификация Н. Н. Чебоксарова). Каждая из этих форм эволюционно приспособлена к определенным климатическим условиям и имеет несколько различную анатомию. Например, коренное население Арктики (относится к монголоидной расе) веками адаптировалось для проживания в суровых климатических условиях, что нашло отражение в анатомических особенностях строения полости носа. Представители же негроидно-австралоидной расы (индусы, африканцы и др.) более адаптированы для проживания в тропических климатических условиях.

Исследование индивидуальных особенностей физиологии дыхания, а также теплообменных процессов в ней, может быть полезным в условиях освоения Арктики человеком, в частности при формировании научных экспедиций, освоении арктических нефтяных месторождений. В статье представлены результаты многолетних исследований теплообменных и гидродинамических процессов в дыхательной системе человека. Данные исследования развивались в двух основных направлениях – это (1) диагностика, разработка метода диагностики и аппаратуры [5-6], и (2) экспериментальное и численное моделирование [7-8]. Акцентом исследования стала его направленность на анатомические особенности формы полости носа.

Литература

1. Заболеваемость всего населения России в 2017 году. Статистические материалы. Министерство здравоохранения РФ. Ч.1. М. 2018. 140 стр. *Zabolevaemost' vsego naseleniya Rossii v 2017 godu. Statisticheskie materialy. Ministerstvo zdravooohraneniya RF. CH.1. M. 2018. 140 str.*
2. Воронин, Алексей Анатольевич. Исследование воздушных течений в каналах и полостях нерегулярной формы: диссертация ... кандидата технических наук / Воронин Алексей Анатольевич. – СПб, 2013. – 142 с. *Voronin, Aleksej Anatol'evich. Issledovanie vozdushnyh techenij v kanalah i polostyah neregulyarnoj formy : dissertaciya ... kandidata tekhnicheskikh nauk / Voronin Aleksej Anatol'evich. – SPb, 2013. – 142 S.*
3. Znu J. "A numerical study of airflow through human upper airways," National University of Singapore. 2012. 192 p.
4. Неронов Р.В., Гайворонский А.И. Особенности строения лепто-, мезо- и платикавитальной полости носа // Российская оториноларингология. 2016. № 5 (84). С. 72-79. *Neronov R.V., Gajvoronskij A.I. Osobennosti stroeniya lepto-, mezo- i platikavital'noj polosti nosa // Rossijskaya otorinolaringologiya. 2016. № 5 (84). S. 72-79.*
5. Лукьянов Г.Н., Рассадина А. А., Усачев В.И. Исследование тепло- и массообменных характеристик дыхания. // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2005. – Т. 48. – № 5. – С. 63-66 *Luk'yanov G.N., Rassadina A.A., Usachev V.I. Issledovanie teplo- i massoobmennyykh harakteristik dyhaniya. // Izvestiya vysshix uchebnykh zavedenij. Priborostroenie. – 2005. – T. 48. – № 5. – S. 63-66*
6. Malyshev A.G., Zhumashev N.K., Lukyanov G.N., Mynbaev K.D., Rassadina A.A. Application of a led-photodiode optocouple for the study of human respiratory function. // Journal of Physics: Conference Series. – 2015. – V. 643. – № 1. – P. 012026. DOI: 10.1088/1742-6596/643/1/012026
7. Lukyanov G., Rassadina A., Neronov R. Estimation of the air flow behavior in the 3D solid and numerical models of nose. // Conference of Open Innovations Association, FRUCT. 2019. – № 24. – P. 235-242. DOI: 10.23919/FRUCT.2019.8711927
8. Лукьянов Г.Н., Воронин А. А., Рассадина А. А. Моделирование конвективных потоков в каналах нерегулярной формы на примере полости носа и околоносовых пазух человека // Журнал технической физики – 2017. – Т. 87. – № 3. – С. 462-467 DOI: 10.21883/JTF.2017.03.4256.1919

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ ВЛАГОСОДЕРЖАНИЯ ПРИРОДНОГО ГАЗА В ПРИЗАБОЙНОЙ ЗОНЕ И СТВОЛЕ ГАЗОВЫХ СКВАЖИН

Рожин И. И.¹, Иванов Г. И.^{1, 2}

¹ Институт проблем нефти и газа СО РАН
Якутск, Россия

² Северо-Восточный федеральный университет им. М. К. Аммосова
Якутск, Россия

Аннотация. Исследована динамика влагосодержания газа в призабойной зоне и стволе газовых скважин в зависимости от динамики температуры и давления. Вычислительный эксперимент выполнен в рамках моделей неізотермической фильтрации реального газа в пласте и образования/диссоциации газовых гидратов в скважине. Показано, что при отборе с постоянным расходом зависимость доли влаги в газе от температуры наиболее выражена в зонах преобладания эффекта Джоуля-Томсона, а в остальном его значение определяется изменением давления.

Abstract. The dynamics of the moisture content of gas in the bottomhole zone and the bore of gas wells, depending on the dynamics of temperature and pressure, has been investigated. The computational experiment was carried out within the framework of models of non-isothermal filtration of real gas in the reservoir and the formation / dissociation of gas hydrates in the well. It is shown that in the case of sampling with a constant flow rate, the dependence of the moisture content in the gas on temperature is most pronounced in the zones where the Joule-Thomson effect predominates, and the rest of its value is determined by the change in pressure.

Влагосодержание природного газа (ВПГ) – важнейший параметр, в значительной степени определяющий технологический процесс добычи, сбора и подготовки газа к дальнему транспорту на газовом промысле. Газ в пластовых условиях насыщен парами воды, поскольку пласты-коллекторы газовых и газоконденсатных месторождений содержат связанную, подстилающую или краевую воду. ВПГ в продуктивном пласте увеличивается при падении пластового давления по мере разработки месторождения. К факторам, определяющим ВПГ, относятся давление, температура, состав газа, а также количество солей, растворенных в воде, контактирующей с газом.

В работе [1] выполнен анализ динамики температуры и давления в пласте и их влияния на влагосодержание добываемого газа. Связь между влагосодержанием и давлением и температурой описывалась эмпирическими зависимостями, основанными на формуле Бюкачека [2]. Актуальность решения задачи определяется тем воздействием, которое оказывает пластовая вода на гидратообразование, а также необходимостью осушки газа перед его подачей в магистральный газопровод.

В данной работе для определения динамики распределения давления и температуры газа в призабойной зоне и стволе газовой скважины решается сопряженная задача неізотермической фильтрации реального газа при его отборе [3, 4] и процесса образования/отложения газовых гидратов в стволе скважины [5, 6] с учетом теплообмена пласта и скважины с окружающими горными породами. Отличием от работы [1] задача неізотермической фильтрации решена в двумерной осесимметричной постановке, а также на забое скважины задается постоянный массовый расход.

Расчеты выполнялись при значениях параметров, соответствующих газоконденсатным месторождениям Республики Саха (Якутия): Средне-Вилуйскому и Отраднинскому [1, 6]. Вычислительный эксперимент длился до полной закупорки скважины гидратами и составил 308,7 часов и 4,99 часов соответственно.

На рис. 1 видно, что в пласте весовая доля паров воды в газе невелика, хотя растет все расчетное время (рис. 1а) и увеличивается по мере приближения к скважине. Следует отметить, что влагосодержание обратно пропорционально пластовому давлению как по радиальной координате, так и по времени. В ходе расчета было получено, что для Средне-Вилуйского месторождения образование гидратов в скважине, которое сопровождается поглощением влаги, наблюдается в приустьевой зоне.

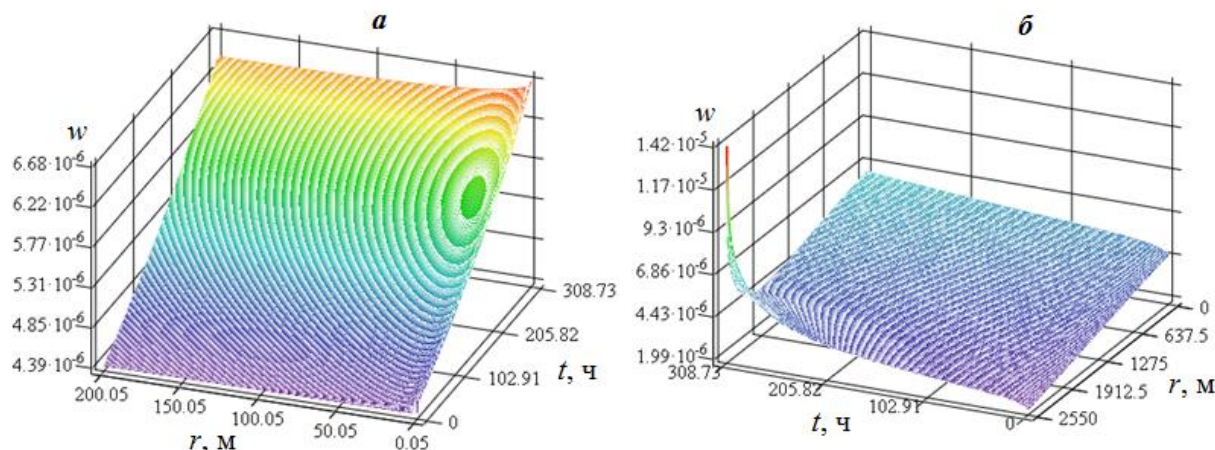


Рис. 1. Динамика распределения влагосодержания газа в пласте (а) и стволе скважины (б) для Средне-Вилуйского месторождения

По мере уменьшения проходного сечения скважины гидратами наблюдается резкий рост доли влаги в газе – в конце расчетного времени на устье скважины ее отметка достигает значения $w = 0,704$ (данное значение на рисунке 1б для удобства представления результатов урезано). При понижении температуры происходит уменьшение количества водяных паров в газовой фазе, а со снижением давления, наоборот, увеличивается содержание влаги в газе.

Аналогичные результаты получены для Отраднинского месторождения. Весовая доля влаги в газе как в пласте, так и в скважине возрастает во времени. В конечный период отбора на устье скважины наблюдается резкий рост влагосодержания, его значение в момент полной закупорки скважины гидратами составило $w = 0,954$. Следует отметить, что при отборе с постоянным массовым расходом дросселирование наиболее ярко выражено в призабойной зоне пласта во все расчетное время и в приустьевой зоне скважины в момент её закупорки гидратами – газ сильно охлаждается, а в остальном температура газа меняется равномерно и на незначительную величину.

Таким образом, при отборе газа с постоянным массовым расходом зависимость влагосодержания газа в пласте и скважине от температуры наиболее выражена в зонах преобладания эффекта Джоуля-Томсона, а в остальном его значение определяется за счет изменения давления.

Литература

1. Бондарев Э.А., Рожин И. И., Аргунова К. К. Влагосодержание природного газа в призабойной зоне пласта // Записки Горного института. – 2018. – Т. 233. – С. 492–497.
2. Bukacek R.F. Equilibrium moisture content of natural gases // Research Bulletin. Institute of Gas Technology, Chicago, USA. – 1955. – Vol. 8, N 11. – P. 20.
3. Термогидродинамика систем добычи и транспорта газа / Бондарев Э.А., Васильев В.И., Воеводин А.Ф. и др. – Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1988. – 272 с.
4. Николаев В.Е., Иванов Г.И., Рожин И. И. Численное моделирование влияния теплообмена пласта-коллектора с вмещающими породами на отбор газа через одиночную скважину // Сибирский журнал вычислительной математики. – 2013. – Т. 16, №4. – С. 337–346.
5. Бондарев Э.А., Рожин И. И., Аргунова К. К. Моделирование образования гидратов в газовых скважинах при их тепловом взаимодействии с горными породами // Инженерно-физический журнал. – 2014. – Т. 87, №4. – С. 871–878.

6. Бондарев Э.А., Рожин И. И., Аргунова К. К. Особенности математического моделирования систем добычи и транспорта природного газа в арктической зоне России // Записки Горного Института. – 2017. – Т. 228. – С. 705–716.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ ГИДРАТОВ ПРИРОДНОГО ГАЗА ПРИ СОВМЕСТНОЙ РАБОТЕ ПЛАСТА И ГАЗОВОЙ СКВАЖИНЫ

Рожин И. И.¹, Иванов Г. И.^{1, 2}

¹ Институт проблем нефти и газа СО РАН
Якутск, Россия

² Северо-Восточный федеральный университет им. М. К. Аммосова, Якутск, Россия

Аннотация. Модель, в которой давление и температура газа на забое скважины считаются постоянными, приводит к завышению времени образования гидратной пробки для скважин с температурой пласта, существенно превышающей равновесную температуру гидратообразования. Для скважин с температурой пласта примерно равной температуре гидратообразования, время полной закупорки будет немного больше в случае, когда в модели учитывается изменение температуры и давления газа на забое скважины в процессе отбора газа.

Abstract. The model, in which the pressure and temperature of the gas at the bottom of the well are considered constant, leads to an overestimation of the formation time of a hydrate plug for wells with a formation temperature significantly exceeding the equilibrium temperature of hydrate formation. For wells with a formation temperature approximately equal to the temperature of hydrate formation, the time of complete plugging will be slightly longer if the model takes into account the change in temperature and pressure of gas at the bottom of the well during gas production.

При совместной работе газоносного пласта и скважины температура и давление газа на забое изменяются, они определяются на основе решения системы уравнений двумерной осесимметричной задачи отбора газа через одиночную скважину, расположенную в центре кругового пласта [1, 2]. В данной модели неизотермической фильтрации газа считается, что перенос тепла по радиальной координате за счет теплопроводности пренебрежимо мал по сравнению с конвективной составляющей. На стенке скважины ставится условие постоянного массового расхода газа, на контуре питания – условия непроницаемости и отсутствия теплового потока, а на кровле и подошве пласта – условия непроницаемости и теплообмена с вмещающими горными породами.

Затем рассматривается сопряженная задача теплообмена между несовершенным газом в скважине и окружающей средой (горными породами) [3, 4], которая сводится к решению дифференциальных уравнений, описывающих неизотермическое течение газа в скважине, и уравнения распространения тепла в горных породах с соответствующими условиями сопряжения. При этом в квазистационарной математической модели образования (диссоциации) гидратов в газовых скважинах учитывается зависимость коэффициента теплопередачи от газа к внутренней стенке трубы от изменяющейся со временем площади проходного сечения.

Следовательно, алгоритм численного решения сопряженной задачи отбора газа, гидратообразования и теплообмена скважины с горными породами описывается следующим образом:

1. Задаются геометрические и физические параметры, а также начальные условия.
2. Решается задача отбора газа через одиночную скважину, определяются давление и температура на забое скважины.

3. При фиксированной площади проходного сечения скважины методом Рунге–Кутты 4-го порядка вычисляются давление и температура газа в скважине.

4. Из уравнений, описывающих изменение площади проходного сечения скважины со временем, делая шаг по времени, находится новое значение площади проходного сечения.

5. Определяется температурное распределение в массиве горных пород, то есть решается задача теплопроводности (в области многолетней мерзлоты – задача Стефана).

На каждом временном шаге пункты 2–5 повторяются.

Расчеты выполнялись при значениях параметров, соответствующих газоконденсатным месторождениям Республики Саха (Якутия): Средне-Вилуйскому и Отраднинскому [4]. Данные месторождения имеют существенно различные составы природного газа, а также пластовые и геотермические условия при примерно равной глубине продуктивного горизонта (2550 м и 2480 м соответственно).

Из динамики площади проходного сечения (рис. 1) следует, что существенно уменьшается продолжительность процесса полной закупорки скважины: при постоянных пластовых условиях гидратная пробка образуется через 400 часов, а при учете изменений пластовых условий – через 309 часов. Здесь начальное значение безразмерного сечения скважины S соответствовало отсутствию газовых гидратов. Гидратная пробка образуется вблизи устья скважины, а её нижняя граница находится много выше подошвы многолетней мерзлоты (500 м): на глубине 25 м при постоянных пластовых условиях и на 50 м – при изменении пластовых условий.

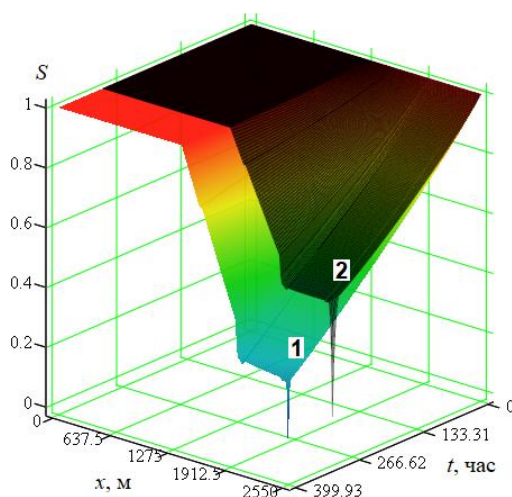


Рис. 1. Изменение площади проходного сечения скважины Средне-Вилуйского месторождения по глубине и во времени при расходе $M = 9$ кг/с: 1 – при постоянных пластовых условиях, 2 – при учете изменений пластовых условий

Для Отраднинского месторождения изменение проходного сечения будет менее резким. При сравнении для обоих случаев время образования гидратной пробки составит 5 часов. Тем не менее, температура газа ниже равновесной температуры и, следовательно, гидраты могут образовываться по всему стволу скважины. Но наиболее интенсивно этот процесс идет в его верхней части, примерно соответствующей мощности многолетней мерзлоты (680 м). В конце процесса отбора газа на уровне забоя скважины примерно 27% проходного сечения будет перекрыто.

Литература

1. Бондарев Э.А., Васильев В.И., Воеводин А.Ф. и др. Термогидродинамика систем добычи и транспорта газа / Отв. ред. В.И. Марон. – Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1988. – 272 с.

2. Николаев В.Е., Иванов Г.И., Рожин И. И. Численное моделирование влияния теплообмена пласта-коллектора с вмещающими породами на отбор газа через одиночную скважину // Сибирский журнал вычислительной математики. – 2013. – Т. 16, №4. – С. 337–346.
3. Бондарев Э.А., Рожин И. И., Аргунова К. К. Моделирование образования гидратов в газовых скважинах при их тепловом взаимодействии с горными породами // Инженерно-физический журнал. – 2014. – Т. 87, №4. – С. 871–878.
4. Бондарев Э.А., Рожин И. И., Аргунова К. К. Особенности математического моделирования систем добычи и транспорта природного газа в арктической зоне России // Записки Горного Института. – 2017. – Т. 228. – С. 705–716.

ФОРМИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА ГРУНТОВ МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛОГО ОСНОВАНИЯ БУРООПУСКНЫХ СВАЙ

Цеева А. Н., Матвеева О. И., Семенова Н. П.
АО «Якутский государственный проектный
научно-исследовательский институт строительства»
Якутск, Россия

Аннотация. В докладе приводятся примеры формирования температурного режима грунтов основания буроопускных свай, одиночных и кустов, являющихся фундаментами зданий и сооружений в г.Якутске, и результаты расчетов с использованием программы FROST 3D. Показано, что к началу загрузки свай не успевают формироваться расчетные температуры грунтов, определяемые согласно СП 25.13330.2012. Это приводит к замедлению темпов строительства, соответственно плановых сроков завершения строительства. На основании приводимых фактических данных и результатов расчетов предлагается внести изменения в свод правил.

Abstract. The report provides examples of settling the temperature regime of soils of bored piles foundations, single and clusters, which are the foundations of buildings and structures in Yakutsk, and the results of calculations using the FROST 3D program. It has been shown, that by the beginning of loading the piles, the calculated soil temperatures, determined according to construction rules 25.13330.2012, fail to set in due time. This leads to a slowdown in the pace of construction and, respectively, prolong the planned completion date of construction. Based on the actual data and calculation results, it has been proposed to amend the set of rules.

Несущая способность основания свайных фундаментов зависит от температур многолетнемерзлых грунтов. При проектировании зданий и сооружений расчеты многолетнемерзлых грунтов согласно СП 25.13330.2012 [1] производят при расчетных температурах, определяемых с учетом теплового взаимодействия сооружений с многолетнемерзлыми грунтами основания в установившемся тепловом режиме с учетом переменных в годовом периоде условий теплообмена на поверхности, формы и размеров сооружения, глубины заложения и расположения фундаментов в плане, а также теплового режима сооружения и принятых способов и средств сохранения мерзлого состояния грунтов основания. При этом в высокотемпературных грунтах расчетные температуры получаются значительно ниже естественных. За счет изменения поверхностных условий: отсутствия снега в зимний сезон и исключение попадания солнечных лучей в летний период. Такой подход был продиктован результатами исследований температурного режима грунтов застроенных зданий в конце 60-х и начале 70-х годов прошлого столетия. Было установлено значительное снижение естественных температур грунтов застроенных зданий в Якутске. Таким образом, в СНиП II-18-76 впервые вошли формулы для определения расчетных температур грунтов, учитывающие понижение температур грунтов под застроенными зданиями с вентилируе-

мыми подпольями. С тех пор без изменения данная методика включается во всех последующих переизданиях, в том числе в актуализированную редакцию строительных норм СП 25.13330.2012. Тем временем современные методы и темпы строительства значительно изменились, ускорились сроки возведения зданий и сооружений, что позволяет за один сезон возводить многоэтажные здания и передавать расчетные нагрузки на основание. В таком случае в основании не успевают сформироваться проектный температурный режим грунтов, что может значительно притормозить завершение строительства. Особенно при наличии в основании зданий и сооружений таликовых зон и применения кустов свай под колонны.

В докладе приводятся примеры формирования температур грунтов различных объектов в Якутске: на площадке строительства около с. Табага, в центральной части города, в 47-м квартале и в промышленной северо-восточной части города. Формирование температур грунтов зависит от времени года их установки, естественных температур грунтов, от количества свай в кустах. Например, в таблице 1 приведены температуры грунтов около сваи № 58 многоквартирного жилого дома: в период проведения инженерных изысканий в 2019г., расчетные и фактические после установки свай здания, с сентября 2020г по апрель 2021г.-. Свая № 58 является одной из свай кустового расположения свайных фундаментов в средней части свайного поля.

Таблица 1
Температуры грунтов около сваи № 58

№ скважин	Дата замеров	Глубины, в м.									
		1,0	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0	7,0	8,0	9,0	10,0
9-19	22.12.19	-6,15	-0,85	-0,23	-0,47	-0,69	-0,90	-1,05	-1,29	-1,29	-1,42
9-19	расчетные	-0,61*	-0,77	-0,87	-1,23	-1,5	-1,66	-1,78	-1,78		
Свая №58	23.09.20	+11,0	+13,8	+13,8	+10,8	+5,9	+1,6	+0,0	+0,0	+0,0	+0,0
		+7,1	+10,0	+8,9	+5,9	+2,8	+0,3	-0,0	-0,0	-0,0	-0,0
	20.10.20	-1,3	+3,7	+5,3	+4,7	+3,0	+1,3	+0,3	-0,0	-0,0	-0,0
		-17,0	-8,5	-1,2	-0,0	+0,1	+0,1	-0,1	-0,1	-0,0	-0,1
	23.11.20	-9,0	-5,8	-1,1		+0,1	+0,1	-0,0	-0,0	-0,0	-0,1
		-5,7	-4,6	-2,2	-0,0	+0,0	+0,0	-0,0	-0,0	-0,1	-0,1
	28.02.21				-0,2						
	31.03.21										
	25.04.21										

* – расчетная температура на глубине 3,5м

Как видно из таблицы, произошло значительное повышение температур грунтов – полное их растепление при установке свай. За наблюдаемый период отмечается понижение температур грунтов во времени. Тем не менее после 9-ти месяцев выстойки свай, причем в зимний сезон, температуры грунтов ниже 4м остаются выше температуры начала замерзания грунтов. При этом расчетные температуры еще ниже, чем фактические.

Такое же формирование температур после устройства буроопускных свай наблюдается и в основании возводимого объекта «Круглогодичный детский центр отдыха и оздоровления "Полярная звезда" в РС (Я)» на незастроенной территории Старая Табага, в пригороде Якутска.

Были установлены наблюдения за формированием температурного режима основания буронапускных свай в высокотемпературных грунтах на промышленной незастроенной площадке в северо-восточной части Якутска. Как показали эти наблюдения, даже около одиночных буронапускных свай, устанавливаемых с заполнением пазух скважин цементно-песчаным раствором в высоко-температурных грунтах восстановление естественных температур грунтов занимает практически год времени.

Кроме того, выполнены прогнозные теплотехнические расчеты формирования температур грунтов вокруг буронапускных свай с использованием программы FROSN 3D, которые также показывают продолжительный период восстановления естественных температур основания свай.

Эти исследования и обобщение фактических данных показывают, что назначение расчетных температур по СП25.13330.2012 для определения несущей способности свай не соответствует фактическим значениям температур грунтов на период передачи нагрузок на сваи. Такая ситуация требует внесения изменений в нормативные документы по проектированию зданий и сооружений на многолетнемерзлых грунтах.

СФЕРИЧЕСКАЯ КОНСТРУКЦИЯ ЗДАНИЯ КАК ВАРИАНТ ДЛЯ СОЛНЕЧНОГО ОТОПЛЕНИЯ В РЕГИОНАХ С ХОЛОДНЫМ КЛИМАТОМ

Тарасов И. И., Малышев А. В.

Институт физико-технических проблем Севера им. В. П. Ларионова СО РАН
Якутск, Россия

Аннотация. В данной работе ищутся возможные параметры солнечных коллекторов и тепловых аккумуляторов, позволяющие в течении всего отопительного сезона отапливать здание за счет солнечной энергии. Приведены формулы расчета температуры теплового аккумулятора полусферической формы, расположенного под полусферическим зданием. Получены помесечные и среднегодовой коэффициент полезного использования энергии солнечной радиации, общая площадь апертуры солнечных коллекторов, и объем бака-накопителя, достаточные для полного обеспечения в течении всего отопительного периода потребности здания в отоплении за счет солнечной энергии, намечены пути дальнейшего повышения эффективности работы системы солнечного отопления.

Abstract. In this paper, we are looking for possible parameters of solar collectors and thermal accumulators that allow heating the building with solar energy during the entire heating season. Formulas for calculating the temperature of a hemispherical heat accumulator located under a hemispherical building are given. The monthly and average annual efficiency of solar radiation energy, the total area of the aperture of solar collectors, and the volume of the storage tank sufficient to fully meet the heating needs of the building during the entire heating period due to solar energy are obtained, ways to further improve the efficiency of the solar heating system are outlined.

Обзор работ в России по использованию солнечной энергии в горячем водоснабжении и отоплении показывает в настоящее время постоянную тенденцию к росту площади применяемых солнечных коллекторов и объемов баков-накопителей, что ведет к росту доли солнечной энергии, занимаемой в общем энергобалансе дома [1]-[6].

В данной работе рассчитываются параметры системы «солнечные коллектора – накопитель тепла – здание», достаточные для максимально возможного замещения солнечной энергией потребностей здания в отоплении в климатических условиях г. Якутска [7]. Согласно нормативам потребления тепловой энергии для населения [8], на нужды отопления 1-этажного жилого дома в Якутии требуется от 0,0468 до

0,0559 Гкал на 1 м² в месяц. В качестве исходных данных взяты среднесуточная температура окружающего воздуха в г. Якутске [7] по декадам месяцев года и температуры грунта в г. Якутске [8] по месяцам и глубинам. Предложена сферическая конструкция здания половина, которого погружена в грунт. Вторая половина сферической конструкции погруженного в грунт представляет собой тепловой аккумулятор (ТА). Проведены расчеты тепловых потерь через сферическую ограждающую конструкцию. Предложена методика расчета температур в ТА. Получены параметры водяного ТА для низкотемпературной системы отопления.

Расчеты баланса тепла в системе солнечные коллектора – тепловой аккумулятор – дом показывают, что климатических условиях Якутска 67 м² вакуумных солнечных коллекторов и 253 тонн воды в баке-накопителе под домом достаточно для полного обеспечения теплом в течении всего отопительного сезона полусферического дома общей площадью 78 м², утепленного 30 см пенополистирола и с частичной рекуперацией поступающего в дом наружного воздуха.

Коллекторами улавливается 40,3% падающей на горизонтальную поверхность солнечной радиации. Из этой величины на нужды отопления дома используется 35,2%. Следовательно, общий КПД работы всей системы 14,2%, что позволяет надеяться, что дальнейшие исследования приведут к значительному повышению показателей работы солнечной системы отопления в регионах с холодным климатом

Литература

1. Попель О.С., Фрид С.Е., Коломиец Ю.Г. Эффективность использования солнечного излучения для нагрева воды на территории Российской Федерации. VI Международная конференция «Возобновляемая и малая энергетика – 2009». Выпуск 5. С. 59-68.
2. Фортов В.Е., Попель О.С. Энергетика в современном мире: Научное издание. Долгопрудный: Интеллект, 2011. 168 с.
3. Фрид С.Е., Коломиец Ю.Г., Мордынский А. В., Сулейманов М.Ж., Арсатов А. В., Ощепков М.Ю. Эффективность солнечных водонагревателей в климатических условиях России. Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Технические науки. 2012. № 6. С. 21-26.
4. Солнечные системы теплоснабжения. ПК «АНДИ Групп». <https://andi-grupp.ru/informatsiya/stati/solnechnye-sistemy-teplosnabzheniya/>
5. Щукина Т.В., Шевченко Р. С. Солнечное отопление зданий при условии сокращения периода потребления традиционных ресурсов. СОК. 2017. № 8.
6. Научно-прикладной справочник по климату СССР. Серия 3. Многолетние данные. Части 1-6. Выпуск 24. Якутская АССР. Книга 1. Ленинград, Гидрометеиздат. 1989.
7. Постановление Правительства РС(Я) от 13 октября 2012 г. N 446 «Об утверждении нормативов потребления коммунальных услуг и нормативов потребления коммунальных ресурсов в целях содержания общего имущества в многоквартирном доме.
8. Васильев Г.П., научный руководитель ОАО «ИНСОЛАР-ИНВЕСТ». Геотермальные теплонасосные системы теплоснабжения и эффективность их применения в климатических условиях России. https://www.abok.ru/for_spec/articles.php?nid=3685/

МОДЕЛЬ ГИСТЕРЕЗИСА КАПИЛЛЯРНОЙ КОНДЕНСАЦИИ В ПОРИСТЫХ ТЕЛАХ

Таппырова Н. И., Кравцова О. Н., Протождяконова Н. А.

Институт физико-технических проблем Севера им. В. П. Ларионова СО РАН
Якутск, Россия

Аннотация. В данной работе предложена модель гистерезиса капиллярной конденсации в пористых телах, которая позволяет, в отличие от известных моделей, например, Коэна, получить дополнительную информацию о распределении пор по размерам.

Изотерма адсорбции в пористых телах, в которых происходит капиллярная конденсация, обычно имеет петлю гистерезиса [1,2]. Существует ряд моделей, объясня-

ющих гистерезис изотерм адсорбции [3]. Всеобъемлющей модели, описывающей количественно все реальные случаи гистерезиса изотермы адсорбции, не существует [1]. Широко известная модель Коэна, основанная на том, что конденсация и испарение происходят при разных относительных давлениях, на практике также редко приводит к приемлемым количественным результатам [1].

Предлагаемая в настоящей работе модель, разработанная при сохранении основополагающей идеи модели Коэна, позволяет более точно описать петлю гистерезиса и, в то же время, получить из изотерм адсорбции дополнительную информацию о распределении пор по размерам [4]. В модели Коэна принимается, что длина капилляров бесконечна. Введем в модель конечную длину капилляров в качестве одного из параметров, тогда можно описать случаи, когда изотерма десорбции лежит ниже теоретической кривой, предсказываемой моделью Коэна. При конечной длине капилляров объем адсорбата в капилляре рассчитывается с учетом объема мениска. При адсорбции объем адсорбата в капилляре конечной длины с радиусом r_c при радиусе мениска $2r_m$ будет равен

$$V_a(r_m, r_c) = \pi r_c^2 L - 2 \int_{\sqrt{(2r_m)^2 - (r_c)^2}}^{2r_m} \pi [(2r_m)^2 - (r_c)^2] dr_c, \quad (1)$$

где L – длина капилляра.

При десорбции имеем

$$V_d(r_m, r_c) = \pi r_c^2 L - 2 \int_{r_m}^{\sqrt{(r_m)^2 - (r_c)^2}} \pi [(r_m)^2 - (r_c)^2] dr_c. \quad (2)$$

Введем обозначение

$$\Delta V(r_m, r_c) = V_a(r_m, r_c) - V_d(r_m, r_c). \quad (3)$$

Таким образом, в капилляре при конденсации и испарении находится разное количество адсорбата. Возьмем в качестве основы расчетов адсорбционную ветвь петли гистерезиса. Исходя из этой ветви, в области, где наблюдается гистерезис, строим теоретическую кривую десорбции, соответствующую модели Коэна. По разности между этой кривой и экспериментальной ветвью десорбции строим функцию $\Delta m(r_m)$ (рис. 1).

Используя эту функцию и вышеприведенные выкладки для объема адсорбата в капилляре конечной длины, выведем основное уравнение предлагаемой модели (интегральное уравнение Вольтерра)

$$\int_{r_0}^{r_m} 2\Delta V(r_m, r_c) n(r_c) dr_c = \frac{\Delta m(r_m)}{\gamma}, \quad (4)$$

где $n(r_c) = \frac{dN(r_c)}{dr_c}$ – плотность распределения пор по размерам; $N(r_c)$ – количество капилляров радиус, которых меньше r_c ; $\Delta m(r_m)$ – функция, равная разности между количеством адсорбата, рассчитываемого по модели Коэна, и экспериментальными данными при одинаковом P/P_0 на ветвях десорбции. (рис. 2); γ – плотность адсорбата.

Разработана программа, проведены численные расчеты с условными данными, результаты которых приведены на рис. 2 в виде зависимости $n(r_c)$.

Расчеты показали, что модель позволяет из изотермы адсорбции с петлей гистерезиса получить дополнительную информацию о распределении пор по размерам, а именно, рассчитать количество пор определенного радиуса. Этого нет ни в модели Коэна, ни в других моделях гистерезиса изотермы адсорбции.

Расчеты по предложенной модели показывают, что при определенной плотности распределения пор по размерам $n(r_c)$ ветви конденсации и испарения могут совпадать, даже когда они подчиняются условиям (1) и (2), принятым в модели Козна.

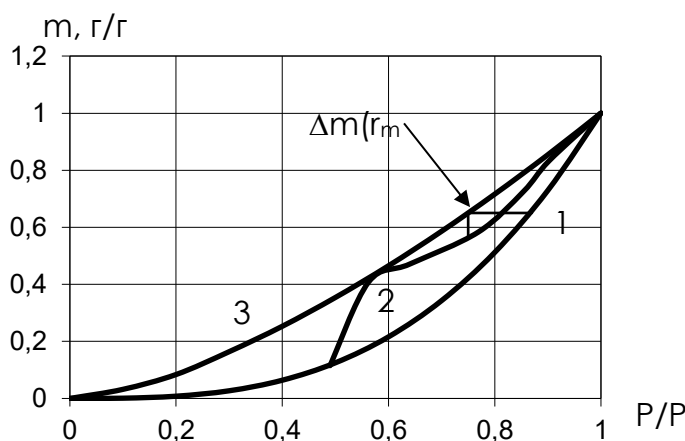


Рис. 1. Изотермы адсорбции с петлей гистерезиса. Экспериментальные кривые: 1 – конденсация; 2 – испарение (десорбция). 3 – теоретическая кривая десорбции, рассчитанная по модели Козна

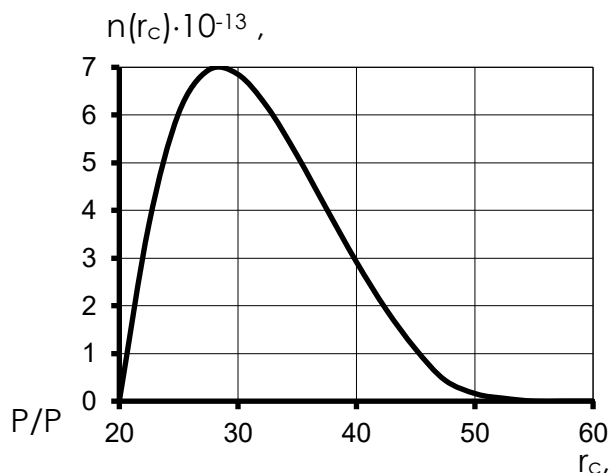


Рис. 2. Зависимость количества цилиндрических пор, приходящихся на единицу интервала их радиуса

Литература

1. Грег С., Синг К. Адсорбция, удельная поверхность, пористость. – М.: Мир, 1984. – 312 с.
2. Neimark A.V., Ravikovitch P.I. Capillary condensation in MMS and pore structure characterization // Microporous and Mesoporous Materials. – 2001. – 44-45. – P. 697-707.
3. Карнаухов А. П. Адсорбция. Текстура дисперсных и пористых материалов. – Новосибирск: Наука, 1999. – 470 с.
4. Старостин Е.Г. Фазовое равновесие воды в горных породах при отрицательных температурах. Дис. ... док. техн. наук, Якутск: Ин-т мерзлотоведения им. П. И. Мельникова СО РАН, 2009.

УДК 693.548.2

СТАРЕНИЕ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ, МОДИФИЦИРОВАННЫХ ПОЛИМЕРНЫМИ ДОБАВКАМИ, В УСЛОВИЯХ ХОЛОДНОГО КЛИМАТА

Кузьмин С. А., Красильников Д. А., Аргунова А. А., Егорова А. Д., Кацурба М. В.
Северо-Восточный федеральный университет им. М. К. Аммосова
Якутск, Россия

AGING OF STRUCTURAL MATERIALS MODIFIED WITH POLYMER ADDITIVES IN COLD CLIMATE CONDITIONS

Kuzmin S.A., Krasilnikov D.A., Argunova A.A. Egorova A.D., Katsurba M.V.

Аннотация. На сегодняшний день одним из основных материалов для строительства зданий и сооружений выступает бетон. Повышение эксплуатационных характеристик бетонов является приоритетной задачей современных научных исследований. Частые переходы через ноль градусов в осенне-весенние сезоны, другие агрессивные факторы очень сказываются на состоянии и сохранности строительных материалов. В данной работе представлен опыт модификации тяжелого бетона М200, полимерной добавкой Амокор КМ. В результате 2х летних натурных испытаний получены данные об увеличении прочностных характеристик материалов.

Abstract. Currently one of the main materials for the construction of buildings and structures is concrete. Improving the performance of concrete is a priority of modern scientific research. Frequent transitions through zero degrees in the autumn-spring seasons, other aggressive factors greatly affect the condition and safety of building materials. This work presents the experience of modifying heavy concrete M200, polymer additive Amokor KM. The data on increased strength characteristics of materials were obtained as a result of 2 years of field tests.

Ключевые слова: бетон, прочность, композит, сжатие, влага, добавка.

Keywords: concrete, strength, composite, compression, wet, polymeric additive.

Весьма актуальным является повышение долговечности и качества строительных материалов, применяемых для изготовления массивных изделий, для устройства оснований, фундаментов, гидротехнических сооружений и др. Существующие материалы по-разному ведут себя в различных климатических зонах. Особенно это относится к Зонам холодного климата. Особую значимость эти вопросы имеют для климатических зон Крайнего Севера: вечную мерзлоту, низкие температуры в зимний период и резкие годовые температурные колебания с амплитудой в 105 градусов. Частые переходы через 0 градусов в течение дня в осенние и весенние периоды, повышенная солнечная радиация из-за прозрачности атмосферы, большая влажность в зонах арктического климата, имеют негативное влияние на физико-механические свойства конструкционных материалов.

Амакор – это серия жидких полимерных материалов позволяющая, вернуть первоначальные физико-механические свойства и даже улучшить их у конструкционных материалов, таким, как бетон, металл, кирпич, дерево и др. Это направление является крайне актуальным в связи с грядущей техногенной катастрофой, угрожающей даже высокоразвитым странам. Так, в США было ликвидировано 137 тысяч аварий только в системе водоснабжения. Для исследования влияния резко-континентального климата Центральной Якутии на механические свойства тяжелого бетона и возможности повышения этих свойств, был использован полимерный материал Амакор КМ для модификации образцов.

Изготовленные образцы из бетона М200 представляют собой балки размером 4х4х16см. ГОСТ 10180-2012. Часть этих образцов была модифицирована добавкой Амакор КМ. Образцы экспонировались на испытательном полигоне – на открытой площадке, а также хранились в неотапливаемом складе и теплой комнате. Дополнительно, некоторая часть образцов, модифицированных и немодифицированных были покрыты краской ОС-12-03 для защиты от солнечной радиации. Экспозиция продолжалась в течение 2 лет. Съемы проводились каждые полгода и подвергались механическим испытаниям на изгиб при комнатной температуре и при -60 С.

Исследования показали, что модификация положительно влияет на долговечность исследуемых материалов. Прочность образцов модифицированных полимерной добавкой Амакор КМ либо не снижается, либо снижается незначительно.

Дополнительная окраска образцов УФ-устойчивой краской ОС-12-03 повышает долговечность модифицированных и немодифицированных образцов, экспонированных на открытой площадке (защита от солнечной радиации).

Проведенные фразктологические исследования показали, что обработка поверхности добавкой Амакор КМ, вызывает уменьшение пористости, частичное растворение хрупких составляющих, то есть частиц, включений, уменьшение, растворение связующих составляющих, в комплексе способствующих однородности структуры, что может вызвать повышение прочностных свойств за счет увеличения плотности и повышения пластичности.

В результате проведенных исследований установлено, что обработка поверхности полимерной добавкой Амакор КМ, вызывает уменьшение пористости, частичное

растворение хрупких составляющих, то есть частиц, включений, уменьшение, растворение связующих составляющих, в комплексе способствующих однородности структуры, что вызывает повышение прочностных свойств за счет увеличения плотности и повышения пластичности.

Литература

1. Современные проблемы строительства и жизнеобеспечения: безопасность, качество, энерго- и ресурсосбережения: сборник статей IV Всероссийской научно-практической конференции, посвященной 60-летию Инженерно-технического института Северо-Восточного федерального университета им. М. К. Аммосова. Якутск, 27-28 октября 2016 г. [Электронный ресурс] / под ред. доц. А.Е. Саввиной. Кузьмин С.А., Красильников Д.А., Петрова Д.С., Слепцова М. Е., Хон З.Н., Никитина Т. И., Николаева А. А., Эверстова А. А. Исследование прочности конструкционных материалов, модифицированного полимерной добавкой «Силор-ультра». стр 228. РАЗДЕЛ 3. СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ.
2. Сборник Всероссийской конференции с международным участием, посвященной 70-летию профессора-механика д.т.н. А. В. Лыглаева «Хладостойкость. Новые технологии для техники и конструкции севера и Арктики» ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЧНОСТИ БЕТОНА М-200, МОДИФИЦИРОВАННОГО ПОЛИМЕРНОЙ ДОБАВКОЙ «СИЛОР-УЛЬТРА» Кузьмин С.А., Красильников Д.А., Рубан Е.А. Якутск, 29-30 сентября 2016.
3. Research of Durability and Structure of the Heavy Concrete Modified by Polymeric Impregnation in the Frigid Climate S.A. Kuzmin, A.A. Argunova, D.A. Krasilnikov, Z.V. Emelianova: Materials Science Forum, 2019. Vol. 945. pp. 250-256.
5. Durability of construction materials modified by polymeric additives. Kuzmin S.A, Egorova A.D, Krasilnikov D.A, Emelianova Z.V. Procedia Structural Integrity, Volume 20, 2019, pp. 278-283.

НЕСТАЦИОНАРНЫЙ МЕТОД ОДНОТОЧЕЧНОГО ТЕМПЕРАТУРНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ТВЕРДЫХ МАТЕРИАЛОВ

Большев К. Н., Иванов В. А., Малышев А. В., Таппырова Н. И.
Институт физико-технических проблем Севера им. В. П. Ларионова СО РАН
Якутск, Россия

Аннотация. Предложена методика определения теплофизических свойств твердых материалов в одной температурной точке при начальной стадии разогрева неограниченной пластины. Разработана программа измерения и расчета теплофизических свойств твердых материалов. Предложенный метод апробирован на известных контрольных образцах – оргстекло и оптическое стекло ЛК-5. Результаты измерений, согласуются с экспериментальными данными полученными другими авторами.

Abstract. A method for determining the thermophysical properties of solid materials at a single temperature point at the initial stage of heating an unlimited plate is proposed. A program for measuring and calculating the thermophysical properties of solid materials has been developed. The proposed method was tested on known control samples-plexiglass and optical glass LK-5. The measurement results are consistent with the experimental data obtained by other authors.

Нестационарные методы определения теплофизических свойств твердых материалов находят широкое применение на практике. Применение этих методов сокращает время продолжительности экспериментов и позволяет из одного эксперимента находить комплекс теплофизических характеристик исследуемых образцов. Кроме того, стоит отметить, что сама измерительная установка при применении нестационарных методов, является простой и включает в себя нагреватель в форме нити или пластины, а также датчика температуры [1]. Ранее одним из авторов статьи был предложен метод начальной стадии нагрева образца, выполненного в форме квадратной пластины, в котором искомые теплофизические свойства определялись по двум тем-

пературным кривым, регистрируемых в двух базовых температурных точках [2]. В работе нами предлагается метод определения теплофизических свойств твердых тел по одной температурной точке, размещенной на границе нагревателя с исследуемым образцом. Измерительная установка для определения теплофизических свойств твердых материалов основана на постановке задачи для неограниченной пластины при заданном постоянном тепловом потоке. Решение этой задачи получено в работе [3]. Искомая температуропроводность определяется методом последовательных приближений [4]. Знание температуропроводности позволяет определить теплопроводность. Результаты, полученные на контрольных образцах и мерах из оргстекла и оптического стекла марки ЛК-5 по предложенной методике количественно согласуются с экспериментальными данными других авторов [5], [6].

Литература

1. Пономарев С.В., Мищенко С.В., Дивин А.Г., Вертоградский В.А., Чуриков А. А. Теоретические и практические основы теплофизических измерений. – М.: Физматлит, 2008. – 408 с.
2. Иванов В.А. Методы и аппаратура комплексных измерений теплофизических и термомеханических свойств и характеристик композиционных материалов и конструкций: диссертация ... доктора технических наук: 05.11.01 / Иванов Василий Алексеевич; [Место защиты: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики»]. – Санкт-Петербург, 2015. – 259 с.
3. Лыков А. В. Теория теплопроводности. – М.: Высш. Шк., 1967. – 600 с.
4. Бахвалов Н. С., Жидков Н.П., Кобельков Г.М. Численные методы. –М.: Изд-во «Лаборатория знаний», 2015. – 636 с.
6. Васильев Л.Л., Фрайман Ю.Е. Теплофизические свойства плохих проводников тепла. – Минск: Наука и техника, 1967. –176 с.
7. Чиркин В.С. Теплопроводность промышленных материалов. – М.: Машгиз, 1962. – 247 с.

ДИНАМИКА ПУЗЫРЕЙ В ТОНКОЙ ПЛЕНКЕ ЖИДКОСТИ И ИСПАРЕНИЕ КАПЕЛЬ НАНО- И ПИКОЛИТРОВОГО ОБЪЕМА

Гатапова Е. Я.

Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН
Новосибирск, Россия, gatapova@itp.nsc.ru

Аннотация. Капли являются ключевым объектом во многих промышленных процессах, таких как камеры сгорания двигателей, струйная печать и спрейное охлаждение. В работе представлены данные по динамике пузырьков в тонкой пленке жидкости при соударении капли о горячую поверхность, а также результаты измерений методами интерферометрии испаряющихся капель нано- и пико-литрового объема.

Abstract. Droplets are a key object in many industrial processes such as engine combustion chambers, inkjet printing and spray cooling. The paper presents data on the dynamics of bubbles in a thin liquid film at droplet impact on a hot surface, as well as the results of measurements by interferometric methods of evaporating nano- and pico-liter droplets.

Капли являются ключевым объектом во многих промышленных процессах, таких как камеры сгорания двигателей, струйная печать и спрейное охлаждение. Конечный результат данных процессов зависит от множества факторов, включая интегральные характеристики и геометрию сопла, физические свойства жидкости, поверхность и условия окружающей среды. Эти сложности с фундаментальной точки зрения часто моделируются на основе результатов, полученных в ходе изучения взаимодействия одиночной капли с нагретой поверхностью. Механизмами теплообмена в двухфазном режиме являются испарение с поверхности тонкой плёнки, вторичная нуклеация, теплотеплопередача на линии контакта. В данной работе представлены экспериментальные

данные по динамике капли жидкости, падающей на нагретую поверхность, а также результаты измерений методами интерферометрии испаряющихся капель нано- и пико-литрового объема.

Для различных чисел Вебера и широком диапазоне изменения температуры твердой поверхности 25 –200 °С определены основные стадии и скорость контактной линии на различных стадиях в зависимости от температуры. Рассмотрены режимы при котором происходит кипение тонкой пленки жидкости [1]. В работе исследуется динамика пузырей в тонкой пленке жидкости, возникающей при ударе капли воды о нагретую поверхность сапфира, методом высокоскоростной визуализации (от 10 тыс до 1 млн кадров в секунду), стереомикроскопа и ИК-сканера. Мы впервые показываем динамику кипения и роль пузырьков в разрыве тонких жидких пленок на нагретых подложках (Рис. 1).

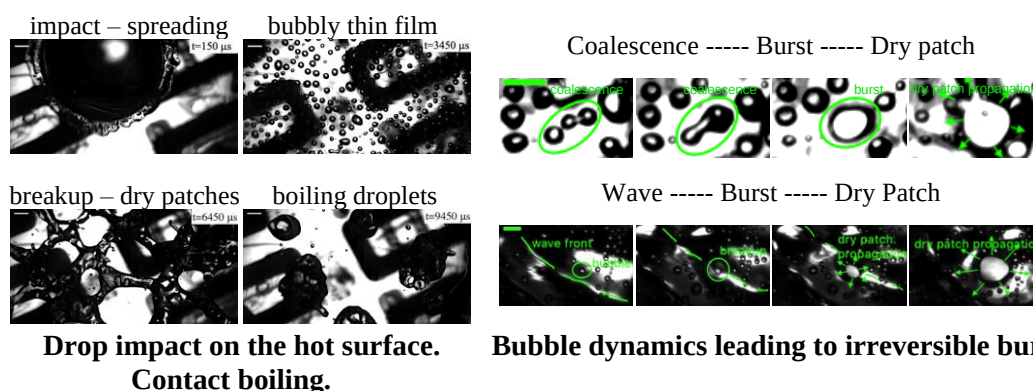


Рис. 1. Динамика пузырей, приводящая к разрушению пленки жидкости при кипении [1]

Продemonстрировано образование одного слоя пузырьков в тонкой пленке жидкости толщиной несколько десятков микрон при соударении капли о горячую подложку при нормальном атмосферном давлении. Показано, что разрыв тонкой пленки жидкости вызван необратимым разрывом пузырьков, который в свою очередь вызван двумя факторами: коалесценцией пузырьков и неустойчивостью, вызванной волной обратного разрыва другого пузырька или волной отката капиллярного обода [1]. Время, необходимое для появления необратимого сухого пятна в результате лопания пузырьков, уменьшается с повышением температуры. Предлагается аналитическое выражение, описывающее снижение гидравлического сопротивления при движении пленки жидкости по пузырькам, находящимся на твердой поверхности. Установлена зависимость от отношения вязкости газа к жидкости, а также от отношения характерного размера пузырей и толщины пленки.

Хотя испарение капель жидкости достаточно хорошо изучено, работ по изучению заключительной стадии испарения капель очень мало. Для исследования тонких капель с нано- и пико-литровыми размерами требуются методы с высоким пространственным разрешением [2]. Мы применяем интерференционный метод с анализом изображений, который позволяет измерять толщину пленки от десятков нанометров до нескольких микрон на относительно большой площади с искривленными участками в зависимости от разрешения оптической системы. Примером будет испаряющаяся капля на гладкой стеклянной поверхности с покрытием или без покрытия. Интерференционные картины были получены с помощью оптического микроскопа с монохромной камеры. Система обеспечивает разрешение 1,1 мкм/пиксель при 10-кратном увеличении и 100 нм/пиксель с 100-кратным увеличением. Подход отличается от классического метода интерференции, в котором для построения используются только пики. Мы используем саму волновую функцию, которая позволяет получать и аппроксимировать данные в каждом пикселе, позволяя получить толщину пленки в каждой точке.

Также можно узнать наклон, кривизну и краевой угол смачивания. Восстановлены профили каплей с краевым углом смачивания менее 5 градусов (Рис. 2). С помощью видеорегистрации можно получить эволюцию области мениска во времени. Измерены толщины в переходной от микро- к нано-пленке области до 40 нм. А применяя процедуру интегрирования фигуры вращения, можно получить объем и площадь поверхности, что позволило рассчитать скорость и интенсивность испарения, что является на сегодняшний день очень востребованным для прикладных задач.

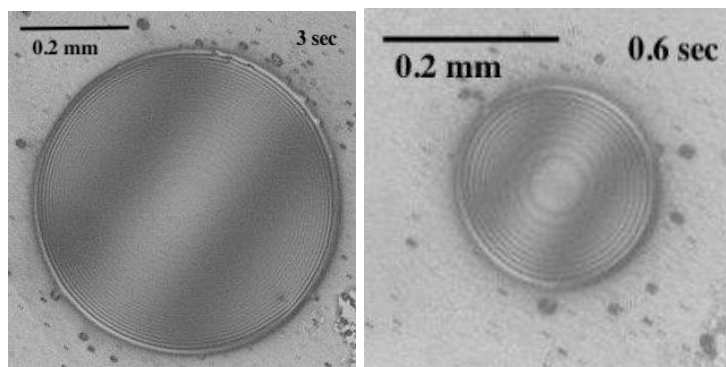


Рис. 2. Интерференционные картины испаряющейся капли

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского Научного Фонда (проект 20-19-00722).

Литература

1. Gatapova E.Ya., Gatapova K.B., Bubble dynamics in thin liquid film and breakup at drop impact. // Soft Matter – 2020. – 16. – 10397–10404.
2. Gatapova E.Ya., Shonina A.M., Safonov A.I., Sulyaeva V.S., Kabov O.A., Evaporation dynamics of a sessile droplet on glass surfaces with fluoropolymer coatings: Focusing on the final stage of thin droplet evaporation. // Soft Matter – 2018. – 14. – 1811-1821.

ИССЛЕДОВАНИЯ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОГО ВЯЗКО-ХРУПКОГО ПЕРЕХОДА В СТАЛЯХ И СПЛАВАХ: СТРУКТУРНЫЙ И ФИЗИЧЕСКИЙ АСПЕКТЫ

Лепов В. В.¹, Архангельская Е. А.², Ачикасова В. С.¹, Григорьев А. В.¹

¹ Институт физико-технических проблем Севера им. В. П. Ларионова СО РАН
Якутск, Россия

² Северо-Восточный федеральный университет им. М. К. Аммосова
Якутск, Россия

Аннотация. Предложен общий теоретический подход к проблеме низкотемпературного вязко-хрупкого перехода, как основной причины хрупкого разрушения элементов конструкций и деталей машин, изготавливаемых из сталей и сплавов с ОЦК-структурой, на основе теории фазовых переходов и квантовой теории теплопроводности. Обсуждаются некоторые возможные технологические способы смещения диапазона вязко-хрупкого перехода материалов в область температур ниже 200 К, включая измельчение структуры и контроль дефектности с помощью синхротронного и протонного облучения.

Abstract. A general theoretical approach to the problem of low-temperature ductile-brittle transition as the main reason of brittle fracture of structural members and machine parts manufactured from steels and alloys with BCC structure is proposed. The approach based on the theory of phase transitions and on the quantum theory of thermal conductivity. Some

possible methods and technologies for the ductile-brittle transition temperature range shifting below 200 K, including the microstructure grinding and defect control by synchrotron irradiation, has been discussed.

Одним из условий построения физически обоснованных моделей хрупкого разрушения является учёт низкотемпературного вязко-хрупкого перехода (НВХП), обусловливающего резкое изменение характера деформации ряда металлов и сплавов [1,2]. Изменение структурного состояния материала не менее важно, чем условия нагружения, стесняющие напряженно-деформированное состояние и усиливающие концентрацию напряжений.

Феноменология НВХП хорошо изучена и для большинства сталей и сплавов укладывается в схему Иоффе-Давиденкова, согласно которой критическая температура хрупкости (хладноломкости) определяется моментом достижения напряжения трения решетки (соответствующего пределу текучести) сопротивления отрыву (микросколу) [3]. Экспериментальные исследования изломов образцов на ударный изгиб, претерпевших вязко-хрупкий переход в области температур 230–240 К, показали, что доля хрупкого излома увеличивается в условиях имеющихся усталостных повреждений [4–5].

Одной из составляющих структурного аспекта является и зависимость температуры хладноломкости от микроструктуры и термообработки, в частности, от среднего размера зерна. Однако в данном случае это обусловлено уже существенным ростом сопротивления отрыву (предела прочности) при уменьшении размера зерна по сравнению с увеличением предела текучести. Измельчение зерна, таким образом, позволяет сохранить вязкий характер разрушения, – трещине в этом случае приходится проходить большее число границ раздела и разнонаправленных кристаллитов в теле зерен [6].

Физический аспект проблемы НВХП состоит в затруднении движения дислокаций при низкой температуре испытаний. Крупнозернистая структура материала увеличивает вероятность трещинообразования за счет более крупных скоплений дислокаций у границ зерен, облегченного их движения внутри кристаллитов. Вязко-хрупкий переход в данном случае может оцениваться как изменение характеристик вязкости разрушения при низкой температуре, или изменение энергии активации в предположении о флуктуационном характере разрушения. Но предполагая, что аномальное поведение физических величин происходит вблизи точки фазового перехода, можно описывать поведение твердого тела при низкотемпературном вязко-хрупком переходе флуктуационной теорией [7].

Таким образом, предполагая, что вязко-хрупкий переход может изменять энергию активации локальных актов разрушения, может быть рассмотрена модель накопления повреждений, основанная известном кинетическом (логистическом) уравнении [2] со следующими начальными и граничными условиями:

$$d\psi/dt = f(T, \sigma)\psi(1 - \psi); \text{ Н.У.: } t = 0, \psi = \psi_0; \text{ Г.У.: } t = R, \psi = 1; \quad (1)$$

где ψ – поврежденность, понимаемая как термодинамическая характеристика упорядоченности микроструктуры за счет диссипации энергии (роста энтропии); $f(T, \sigma)$ – функция, учитывающая влияние определяющих параметров (в данном случае температуры и напряжения) на процесс накопления повреждений, при этом можно выделить воздействие температуры как фактора, контролирующего изменение структуры при фазовом переходе; R – время до достижения материалом предельного состояния (ресурс изделия).

Энергия активации микропластического сдвига будет снижаться за счет изменения микроструктуры с температурой [2], тогда получим:

$$f(T, \sigma) = \exp(<U_0(T)> - \square\square/kT), \quad (2)$$

где $<U_0(T)>$ – усредненная энергия активации пластического сдвига для всего объема образца, которая, в случае НВХП, согласно экспериментальным данным, снижается.

Приближенный анализ (1)-(2) для трубной стали массового применения 09Г2С и среднего уровня напряжений в трубе газового снабжения Якутск-Мастах-Берге показывает, что темп накопления повреждений существенно повышается и предельное состояние материала в условиях периодического НВХП достигается за 10–15 лет вместо расчетных 30–45, что координирует с результатами предыдущих исследований [2].

Выявленный механизм вязко-хрупкого перехода, обусловленного снижением флуктуаций кристаллической решетки на дефектах в виде неметаллических включений, пор и микротрещин, когда ответственным за разрыв связей становится неупругое рассеяние фононов и внешние напряжения, а также накопленные вследствие активной коррозии и длительных циклических нагрузок повреждения, позволяет предложить в качестве практических путей устранения аварий и катастроф, связанных с НВХП, снижение внутренней дефектности материалов, измельчение зерна, использование сталей и сплавов с ГЦК и ГПУ кристаллической решеткой с повышенной вязкостью разрушения.

Одна из разработок для смещения диапазона НВХП в область температур ниже 200 К – интенсивная пластическая деформация и соответствующая термообработка, смягчающая термические напряжения, при которой происходит измельчение границ зёрен, затрудняется возникновение и рост микротрещин, инициирующих хрупкое разрушение.

Работа выполнена в рамках проекта РФФИ 18-48-140015.

Литература

1. Ачикасова В.С., Лепов В. В. Низкотемпературный вязко-хрупкий переход и внутреннее трение // Наука и образование, 2015. 1. С.75-77.
2. Лепов В. В., Ачикасова В.С., Архангельская Е.А. Влияние водорода на кинетику хрупкого разрушения в металлах // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета, 2019. 3 (40). С.29-37.
3. Солнцев Ю. П. Хладостойкие стали и сплавы. Санкт-Петербург: Химиздат, 2005. – 480 с.
5. Григорьев А. В., Лепов В. В. Оценка надежности металлоконструкций из стали 09Г2С, эксплуатируемых в условиях Севера и Арктики // Заводская лаборатория. Диагностика материалов, 2019. – 8 (85). – С.53-58.
6. Lepov V., Grigoriev A., Achikaso V et al. Cold resistance of materials as an integrity factor of railway transport in the Extreme environment / Procedia Structural Integrity, 2019. – 20. – P.57-62.
7. Бондаренко Г.Г., Кабанова Т.А., Рыбалко В. В. Основы материаловедения. М.: Лаборатория знаний, 2015. 763 с.
8. Паташинский А.З., Покровский В.Л. Флуктуационная теория фазовых переходов. М.: Наука, 1982. 382 с.

УСТАНОВКА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ МАТЕРИАЛОВ НЕРАЗРУШАЮЩИМ МЕТОДОМ ПОВЕРХНОСТНОГО НАГРЕВА

Малышев А. В., Степанов А. А., Таппырова Н. И.

Институт физико-технических проблем Севера им. В. П. Ларионова СО РАН
Якутск, Россия

Аннотация. В статье рассматривается применение неразрушающего метода определения теплофизических характеристик тел путем поверхностного нагрева с помощью кругового плоского зонда постоянной мощности. Приводятся зависимости для расчета теплопроводности и температуропроводности. Описывается измерительная установка, а также приведены результаты эксперимента.

Abstract. The article considers the use of a non-destructive method for determining the thermophysical characteristics of bodies by surface heating using a circular flat probe of constant power. Dependencies for calculating thermal conductivity and thermal diffusivity are given. The measuring setup is described, as well as the results of the experiment.

В настоящее время для измерения теплофизических характеристик мерзлых грунтов, строительных и других твердых материалов находят широкое применение

методы, не требующие сложной в техническом исполнении аппаратуры. При их использовании достаточно проводить измерения температуры в каких-нибудь точках исследуемого тела и измерять мощность теплового потока, создаваемого нагревательным элементом. Для определения теплофизических характеристик перечисленных материалов можно применить метод кругового плоского зонда постоянной мощности в различных вариантах, предложенного в работах [1–2].

Метод кругового плоского зонда относится к нестационарным относительным методам контроля теплофизических характеристик. Суть метода заключается в том, что к поверхностям двух полуограниченных в тепловом смысле тел, одно из которых является исследуемым, подводится постоянный тепловой поток через круговой плоский нагреватель. Этот тепловой поток состоит из двух потоков направленных в каждое из тел и, при этом, зависит от радиальной координаты – r .

Результаты измерения теплофизических свойств твердых материалов были получены на эталонном образце из оптического стекла ЛК 5. Построена термограмма нагрева зависимости избыточной средней интегральной температуры нагревателя от обратного корня времени нагрева измеряемого эталонного образца. Рассчитанные по данным термограммы эксперимента с оптическим стеклом ЛК-5 значения λ и α составили соответственно $\sim 1,22 \text{ Вт/(м} \cdot ^\circ\text{C)}$ и $\sim 8,8 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$.

Сравнения полученных теплофизических характеристик с данными, взятыми из [3], показывают, что относительные погрешности определения температуропроводности (α) и теплопроводности (λ) на данной установке соответственно составляют 14 и 3 %.

Литература

1. Гаврильев Р. И. Метод плоского зонда для определения теплофизических свойств массива материалов // ИФЖ. -1993. – Т.64. – № 2. – С.221-227.
2. Свириденко В.И., Ушаков С. И. Исследование теплофизических характеристик кварцевого стекла КВ нестационарным методом // Метрологическое обеспечение теплофизических измерений при низких температурах. – Хабаровск, 1988. – Ч.1. – С. 36-37.
3. Голубев М.П., Павлов А. А., Павлов Ал.А., Шиплюк А. Н. Оптический метод регистрации тепловых потоков // ПМТФ – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2003. – Т.4. – № 4. – С. 174-184.

ЗАВИСИМОСТЬ КОЛИЧЕСТВА НЕЗАМЕРЗШЕЙ ВОДЫ ОТ pH ПОРОВОГО РАСТВОРА

Степанов А. А., Степанов А. В., Кравцова О. Н., Таппырова Н. И.
Институт физико-технических проблем Севера им. В. П. Ларионова СО РАН

Аннотация. В статье изложены результаты экспериментальной работы по определению зависимости количества незамерзшей воды от pH порового раствора методом непрерывного ввода тепла. Получена V-образная зависимость.

Abstract. The article presents the results of experimental work on determination of the dependence of unfrozen water content from the pH of the pore solution by the method of continuous heat input. A V-shaped relationship was obtained.

Значение pH используется для оценки интенсивности почвенной кислотности, и они давно приняты в качестве одного из стандартных критериев для характеристики почвы.

pH определяется как отрицательный логарифм активности водородных ионов, где под активностью принимается эффективная концентрация. Активность – это произведение концентрации и коэффициента активности. Концентрацию можно выразить в молях на 1 л. раствора или в молях на 1000 г. воды, что по существу одно и то же по отношению к значениям pH. Согласно этому, значение pH=1, 3, 5, 7, 9, 11, например, соответствуют активности водородных ионов $10^{-1}, 10^{-3}, 10^{-5}, 10^{-7}, 10^{-9}, 10^{-11}$. Активность водородных и гидроксильных ионов одинаковы при pH=7 и о растворах с pH=7 говорят, что они нейтральны. Растворы с pH ниже 7 – кислые, а с pH выше 7 – щелочные.

Прочность сильно зависит от количества незамерзшей воды в материале. Поэтому фазовый состав поровой воды также должен иметь ярко выраженную связь с pH. Для выявления данной связи нами исследована температурная зависимость количества незамерзшей воды при различных значениях pH. На рис. 1 и 2 приведены зависимость $W_{нв}(T)$ при различных pH. Из рисунка видно, что кислые растворы сильно повышают содержание незамерзшей воды [1].

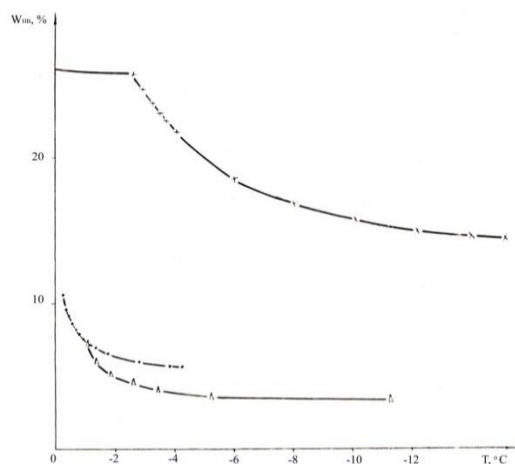


Рис. 1. Зависимость количества незамерзшей воды аргиллита от температуры при различных значениях pH

• – pH=9,9; Δ – pH=7,7; x – pH=1,0

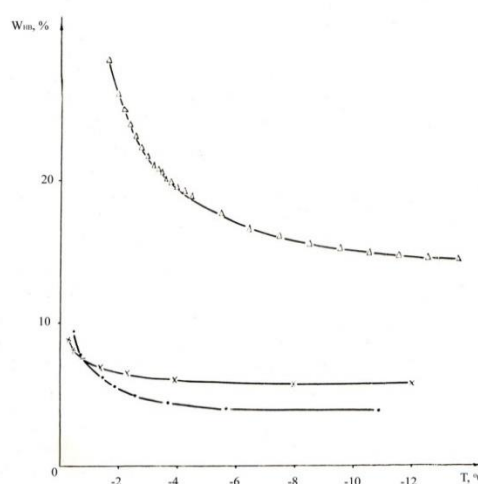


Рис. 2. Зависимость количества незамерзшей воды аргиллита от температуры при различных значениях pH

• – pH=10,3; Δ – pH=1,15; x – pH=7,8

Щелочные растворы сильно не меняют количество незамерзшей воды. Предел длительной прочности от pH имеет S-образную форму. Зависимость $W_{нв}(pH)$ при определенной температуре скорее всего также должна иметь такую же форму. Поэтому в этой области необходимы дальнейшие систематические исследования с привлечением работ по определению прочностных характеристик.

Анализ содержания незамерзшей воды в суглинке при температуре -30°C в зависимости от pH порового раствора при пониженных значениях исходной влажности (20–25 %) показывает, что pH до 9 ед. падает до минимума (рис. 3). При дальнейшем повышении pH до 12 ед. количество незамерзшей воды увеличивается.

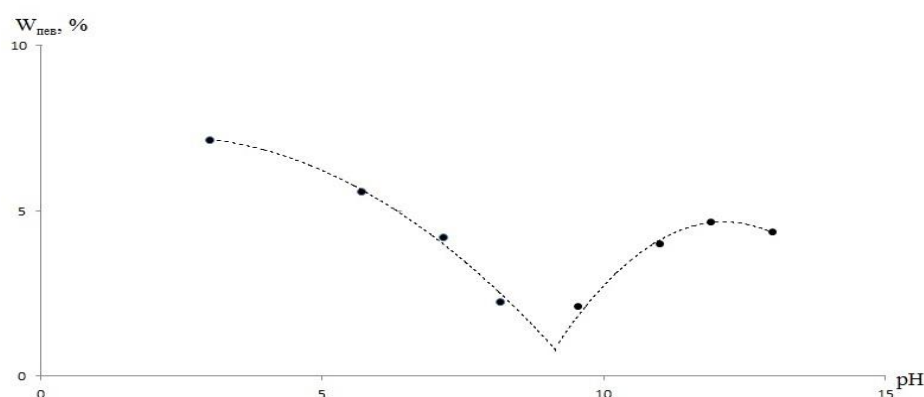


Рис. 3. Содержание незамерзшей воды в суглинке при температуре -30°C в зависимости от pH порового раствора при пониженных значениях исходной влажности (20–25 %)

Шишкин Ю. П. в своих работах показал, что изменение содержания $W_{нв}$ в зависимости от изменения pH полностью коррелируется с изменением прочностных характеристик в зависимости от pH [2].

Литература

1. Степанов А. В. Тепломассообменные свойства техногенных грунтов криолитозоны. – Новосибирск: Наука, 2011, 152 с.
2. Физико-химический подход к направленному изменению прочностных свойств мерзлых пород. Обобщающий отчет. Научный руководитель – к.т.н. Шишкин Ю. П. Якутск, 1989.

Газовые гидраты

Теоретические и экспериментальные исследования образования и разложения природных и техногенных газовых гидратов

EFFECT OF SAND PARTICLES SIZE ON THE CO₂ HYDRATE FORMATION IN THE POROUS MEDIA

Ayaj Ahamad Ansari*, Randeep Ravesh, Pradipta Kumar Panigrahi, Malay Kumar Das
Gas hydrate laboratory, Department of Mechanical Engineering, Indian Institute of Technology Kanpur, 208016, India

*Corresponding author(s): ayaj@iitk.ac.in

Abstract. Gas hydrates are crystalline solids in which gas molecules (CO₂, CH₄, etc.) are trapped inside hydrogen-bonded water molecules at high pressure and low temperature [1]. In this work, a 25-liter pilot-scale reactor is used to store CO₂ gas in the form of CO₂ hydrate. Further, this study aims to evaluate the effect of the sand particle size on the rate of CO₂ hydrate formation and storage capacity. The present study will be helpful for the geological sequestration of CO₂ into the permeable rock of the earth.

Fig. 1 shows the schematic diagram of the experimental setup. The reactor has an internal diameter of 232 mm and a height of 622 mm with a volume of 25L. The reactor is equipped with four RTD sensors with an accuracy of $\pm 0.1^\circ\text{C}$. A pressure sensor with a measuring accuracy of ± 0.1 bar is placed at the top of the reactor head to record the pressure changes inside the reactor. Sand is filled in the reactor in the layer-wise pattern after cleaning the reactor with de-ionized water. A total amount of 39,500 gm of sand and 4750 mL of de-ionized water is used. The reactor is then closed with the air-sealed head and evacuated till a vacuum pressure of 1kPa is achieved. The reactor is maintained at a temperature of 275.15K, and CO₂ gas is charged up to 35 bar. All temperature and pressure are recorded using the data acquisition system.

Fig. 2 shows the pressure and temperature variations during the CO₂ hydrate formation process from the initial conditions of 275.15 K and 35 bar. As shown in fig. 2, a slight temperature peak observed after 50 hours from the start of the experiment indicates the start of hydrate formation. Hydrate formation is an exothermic process [2]. After the hydrate formation starts, reactor pressure continuously decreases, whereas reactor temperature remains constant throughout the experiment.

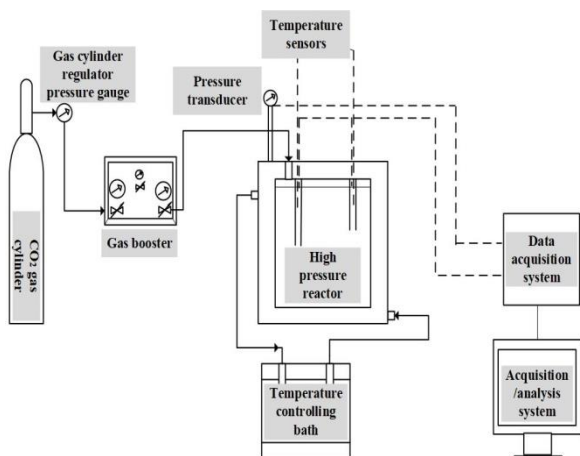


Fig. 1 Schematic of the experimental setup

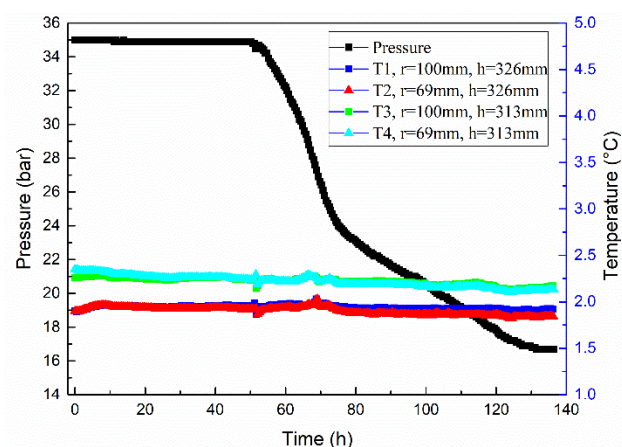


Fig. 2 Pressure and temperature evolution during CO₂ hydrate formation

Fig. 3 shows the effect of the sand particle size on the CO₂ gas consumption during the CO₂ hydrate formation process. The result indicates that the amount of gas consumption increases with the decrease in the sand particles size. As the sand particles size decreases, the surface area of sand particles increases, which provides better contacts between gas and water molecules for hydrate formation.

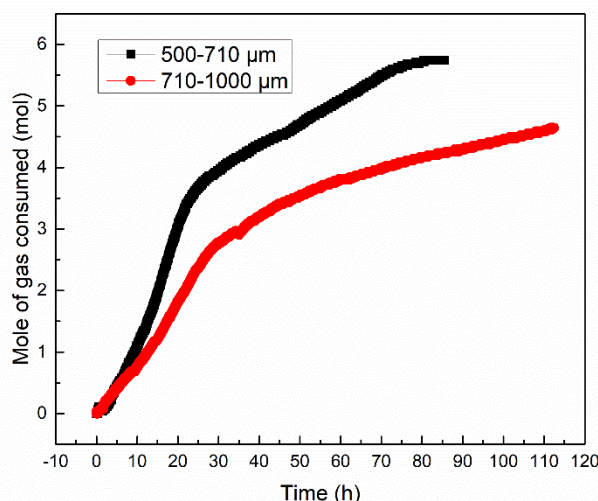


Fig. 3 Amount of gas consumption during CO₂ hydrate formation

References

1. Englezos P. Clahrate Hydrates. Ind Eng Chem Res 1993;32:1251–74.
2. Pahlavanzadeh H, Rezaei S, Khanlarkhani M, Manteghian M, Mohammadi AH. Kinetic study of methane hydrate formation in the presence of copper nanoparticles and CTAB. J Nat Gas Sci Eng 2016;34:803–10. <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2016.07.001>.

ENHANCED GAS RECOVERY FROM METHANE HYDRATE RESERVOIRS USING DEPRESSURIZATION AND MULTIPLE MICROWAVE RADIATION SOURCES

Rahul Yadav*, Malay K Das, Pradipta K Panigrahi
Department of Mechanical Engineering
Indian Institute of Technology Kanpur, Kanpur-208016, India.
*Email: yrahul@iitk.ac.in

Numerical estimates of gas recovery during the induced hydrate dissociation in a marine hydrate reservoir is of significant interest for design and optimization of the production process. For hydrate dissociation in marine settings, the depressurization is believed to be

the most preferred method for gas recovery due to its technical feasibility, and ease of implementation [1]. However, depressurization combined with thermal stimulation may provide enhanced gas recovery in a variety of hydrate reservoirs [2]. In this study, numerical simulations are performed on marine hydrate reservoirs governed by Indian subcontinent geologic settings, subjected to depressurization-based gas recovery and microwave heating based thermal stimulation. An externally coupled hydrate dissociation and geomechanics simulator is developed, validated and applied for the estimation the gas recovery. The strategy of introducing multiple microwave sources in the reservoir is closely examined, and its subsequent impact on total gas recovery and energy efficiency is studied. The preliminary estimates showed that there is an enhanced gas production due to the addition of another microwave source when compared to the single source scenario, however, as the microwave heating is an energy consuming process, overall impact on the energy efficiency of the process should be carefully monitored.

Fig. 1a shows a schematic of the proposed production technique, where instead of one, two microwave sources are placed in the reservoir. The combined volumetric heating caused by microwaves travelling from both the ends is responsible for hydrate dissociation in the reservoir along with applied depressurization at the wellbore. The simulations performed on a typical hydrate reservoir with Indian geologic settings subject to proposed combined method with multiple sources indicate enhanced hydrate dissociation (Fig. 1b). However, high energy consumption may also lead to lower overall efficiency of the process, and therefore, an appropriate control mechanism is desired.

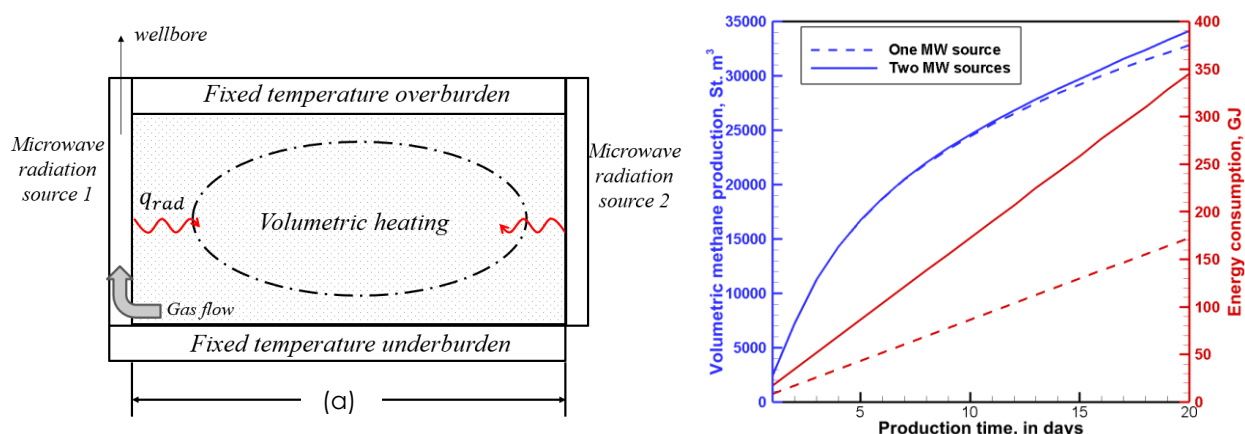


Fig. 1. (a) Schematic of combined depressurization and microwave heating with two wells, and (b) comparison volumetric methane production and energy consumption for both scenarios

References

- Collett TS, Johnson A, Knapp CC, Boswell R et al., Natural Gas Hydrates: Energy resource potential and associated geologic hazards, AAPG Memoir 89, AAPG, 2010.
- He S, Liang D, Li D, Ma L. Experimental investigation on the dissociation behavior of methane gas hydrate in an unconsolidated sediment by microwave stimulation. Energy and Fuels 25, 33–41, 2011.

ДВОЙНЫЕ КЛАТРАТНЫЕ ГИДРАТЫ С «НЕКЛАССИЧЕСКИМИ» ГИДРАТООБРАЗОВАТЕЛЯМИ

Бикбулатова Э. М.¹, Стопорев А. С.^{2,3}, Семенов А. П.², Манаков А. Ю.

¹ Институт нефтехимии и катализа УФИЦ РАН, Уфа, Россия

² Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И. М. Губкина
Москва, Россия

³ Институт неорганической химии им. А. В. Николаева СО РАН
Новосибирск, Россия

Аннотация. В данной работе проведено изучение возможности образования двойных гидратов высокополярными молекулами, в том числе спиртами и азотсодержащими соединениями. Полученные данные могут стать основой для развития газогидратных технологий хранения и транспортировки газов, разделения газовых смесей и опреснения воды.

Abstract. In the current work, we studied the possibility of the formation of double hydrates by highly polar molecules, including alcohols and nitrogen-containing compounds. The data obtained can become the basis for developing gas hydrate technologies for the storage and transportation of gases, separation of gas mixtures, and water desalination.

Газогидратные технологии потенциально могут использоваться в процессах разделения смесей, например, для опреснения воды и извлечения водорода, диоксида углерода, ксенона и т. д. из различных газовых смесей. Другой областью их применения является хранение и транспортировка газа (углеводороды C_1 - C_4 , CO_2) [1, 2]. Поиск новых молекул, способных образовывать двойные гидраты различных структур с компонентами природных и техногенных газовых смесей (попутный нефтяной газ, шахтный газ, топочный газ) позволит наметить пути решения таких глобальных вызовов в экологической и энергетической сферах, как рациональное природопользование, утилизация углекислого газа и водородная энергетика. В данной работе изучено образование двойных газовых гидратов с «неклассическими» вспомогательными гидратообразователями (спирты, азотсодержащие соединения) при умеренных давлениях. Конкретные решаемые задачи включали изучение фазовых равновесий, структуры и состава образующихся гидратов в зависимости от температуры, давления, типа газогидратообразователя и состава водных растворов. Общий подход заключался в систематическом изучении свойств двойных гидратов, образованных выбранными вспомогательными компонентами с чистым метаном, диоксидом углерода или азотом. Структуры гидратов идентифицированы методом порошковой рентгеновской дифрактометрии при низких температурах ($-100\text{ }^{\circ}C$). Методами термоволюмометрии и КР-спектроскопии были определены составы гидратов. Для некоторых вспомогательных гидратообразователей была проведена оценка эффективности двойных газовых гидратов в процессе разделения газовых смесей различного состава. Полученный набор физико-химической информации в дальнейшем позволит провести оценку перспектив развития газогидратных технологий.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 20-79-00178).

Литература

1. Манаков А.Ю., Стопорев А. С. Актуальные аспекты физической химии газовых гидратов и их технологического применения // Успехи химии. – 2021. – Т. – 90(5). – С. 566-600.
2. Zheng J., Chong Z.R., Qureshi M.F., Linga, P. Carbon dioxide sequestration via gas hydrates: a potential pathway toward decarbonization // Energy & Fuels. – 2020. – V. 34(9). – P. 10529-10546.

МОДЕЛЬНАЯ ТЕПЛОВАЯ ЗАДАЧА О РАЗЛОЖЕНИИ ГИДРАТА МЕТАНА В ЗАМКНУТОМ ПОРИСТОМ РЕЗЕРВУАРЕ

Бородин С. Л.

Тюменский филиал Института теоретической и прикладной механики
им. С. А. Христиановича СО РАН
Тюмень, Россия

Аннотация. Рассмотрена задача о повышении давления в замкнутом пористом резервуаре, изначально содержащем гидрат метана, при нагревании. В работе представлена математическая модель, приведены особенности численного решения ее уравнений в зависимости постановки – режим свободного гидрата или самоконсервации. Показаны и описаны результаты численных экспериментов.

В настоящее время наблюдается возрастающий интерес к изучению выбросов в атмосферу метана, который является вторым по значимости парниковым газом [1]. Высокие концентрации метана регистрируются в атмосфере Арктического региона [2]. В этом регионе наблюдается потепление климата, которое проявляется в росте среднегодовых температур воздуха и воды, сокращении площади морского и пресного льда, уменьшении толщины снега, в таянии ледников и изменении температурного режима мерзлых пород. При этом стоит отметить, что на материках гидратосодержащие залежи находятся главным образом в районах вечной мерзлоты, в России эти районы расположены в Арктическом регионе. При повышении температуры в пористой среде возможно разложение газовых гидратов. При разложении газовых гидратов в замкнутой гидратонасыщенной области пористого пласта происходит повышение давления, которое может привести к взрывному разрушению замкнутой залежи и выделению метана в атмосферу. Данное исследование посвящено численным экспериментам по оценке повышения давления в замкнутой гидратонасыщенной залежи при повышении температуры на ее верхней границе.

Задача рассматривалась в двух постановках:

1. Пористая среда содержит метан и его гидрат; начальные термодинамические условия соответствуют стабильному существованию гидрата (режим свободного гидрата).
2. Пористая среда содержит метан, его гидрат и лед; начальные термодинамические условия соответствуют стабильному существованию льда, но при них может разлагаться гидрат метана, однако он не разлагается, так как заключен в ледяную оболочку (режим самоконсервации).

Модельные условия следующие. При повышении температуры на верхней границе для первого случая происходит разложение гидрата метана; для второго случая – сначала плавление льда и только, когда весь лед в некотором бесконечно малом объеме пористой среды, изначально насыщенной метаном, гидратом и льдом, расплавился, только после этого в данном объеме происходит разложение гидрата метана.

Представлены математическая модель, численная реализация и результаты численных экспериментов.

Литература

1. Archer D. Methane hydrate stability and anthropogenic climate change // Biogeosciences. – 2007. – No. 4. – Pp. 521–544. DOI: 10.5194/bg-4-521-2007
2. Васильев А. А., Мельников В. П., Семенов П. Б., Облогов Г. Е., Стрелецкая И. Д. Содержание и эмиссия метана в доминантных ландшафтах типичной тундры Западного Ямала // Доклады академии наук. – 2019. – Том 485, № 1. – С. 88–92. DOI: 10.1857/S0869-5652485188-92

ИССЛЕДОВАНИЕ СИНЕРГЕТИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА СУЛЬФИРОВАННЫХ САХАРОВ С КОММЕРЧЕСКИМИ ИНГИБИТОРАМИ ГИДРАТООБРАЗОВАНИЯ

Варфоломеев М. А., Фархадян А., Павельев Р. С., Стопорев А. С., Зарипова Ю. Ф.,
Ярковой В. В.

Казанский (Приволжский) федеральный университет
Казань, Россия

Аннотация. Разработка добавок, эффективно предотвращающих образование газовых гидратов и коррозию в северных регионах, остаётся актуальной задачей. В данной работе предложен метод модификации простых углеводов, позволяющий получать реагенты, эффективные в ингибировании как гидратов (в виде синергетических добавок к коммерческим ингибиторам), так и коррозии. Предлагаемые синергисты позволяют снизить вредное воздействие на окружающую среду, риски аварий и эксплуатационные расходы.

The development of additives that effectively prevent gas hydrate formation and corrosion in northern regions is a relevant issue. In this work, a method for the modification of simple carbohydrates was proposed, which allows one to obtain reagents that are effective both in hydrate (in the form of synergistic additives to commercial hydrate inhibitors) and corrosion inhibition. The proposed synergists can reduce the harmful effects on the environment, risks of accidents, and operating costs.

Газовые гидраты представляют собой льдоподобные кристаллические соединения, в которых молекулы воды образуют трёхмерную решётку за счёт сети водородных связей. Присутствие в полостях решётки молекул газов, таких как метан, этан или пропан, приводит к её стабилизации при низких температурах и высоких давлениях [1]. В современном мире растущий спрос на энергоресурсы приводит к разработке нефтегазовых месторождений в отдалённых северных и арктических регионах, где термобарические условия благоприятны для образования гидратов в транспортных трубопроводах и прочем оборудовании. В связи с этим возможно формирование газогидратных пробок, что ведёт к риску аварийных ситуаций [2]. Среди методов предотвращения гидратообразования, включающих повышение температуры, снижение давления, изменение состава газа, наиболее эффективным признано введение химических реагентов [3]. Ингибиторы гидратообразования разделяют на две большие группы – термодинамические ингибиторы (ТИГ) и ингибиторы низкой дозировки. ТИГ, такие как метанол, способны полностью предотвратить формирование гидратов путём смещения области их стабильности в сторону более низких температур и высоких давлений. Однако использование подобных соединений резко увеличивает эксплуатационные расходы и требует особой инфраструктуры, такой как резервуары для хранения и оборудование для регенерации. В последние годы широко исследуются ингибиторы низкой дозировки, включающие два класса – кинетические ингибиторы (КИГ) и антиагломеранты. КИГ напрямую влияют на кинетику образования гидратов, задерживая зародышеобразование, тогда как антиагломеранты могут не иметь кинетического эффекта, но ингибируют рост кристаллов [2]. Несмотря на способность ингибировать гидратообразование в транспортных трубопроводах, кинетические ингибиторы мало эффективны в условиях больших переохлаждений. Кроме того, не все из них разлагаемы в естественной среде. Ещё одним ограничением применения таких реагентов является проблема их совместимости с ингибиторами коррозии. Было показано, что ингибиторы гидратообразования и ингибиторы коррозии способны подавлять действие друг друга [4]. Возможным решением является создание бифункциональных реагентов. Другой подход к решению проблемы состоит в добавлении к КИГ

синергетиков, способных предотвратить коррозию и улучшить ингибирование гидратообразования.

В настоящем исследовании была проведена модификация глюкозы и сахарозы путём введения сульфонатных и карбоксильных групп (Рис. 1) для достижения желаемой антигидратной и антикоррозионной активности. Способность к ингибированию гидратообразования была исследована с помощью качающихся ячеек RCS6. Несмотря на то, что полученные вещества сами по себе практически не влияли на зародышеобразование газовых гидратов, выраженный эффект имел место для их смесей с промышленными кинетическими ингибиторами (Luvicar EG и Luvicar 55W). Величина переохлаждения увеличилась на 1,5–3,6 °C при добавлении только 0,1 масс. % синергистов к 0,5 масс. % коммерческих КИГ. Антикоррозионное действие синтезированных соединений было изучено методом гравиметрии, а также с использованием сканирующей электронной микроскопии и профилометрии. Показано, что скорость коррозии снизилась в 3–4 раза в присутствии 0,05 масс. % реагентов и в 8–11 раз при десятикратном увеличении концентрации. Свободные энергии адсорбции на поверхности металла ингибиторов коррозии на основе глюкозы и сахарозы оказались равными -21,1 и -21,5 кДж/моль соответственно. Это указывает на физический тип адсорбции.

Полученные в данной работе реагенты являются биоразлагаемыми веществами и не наносят вреда окружающей среде. Они могут быть полезны в регионах с риском гидратообразования и коррозии трубопроводов.

Исследования выполнены при поддержке РФФИ (грант № 18-05-70121).

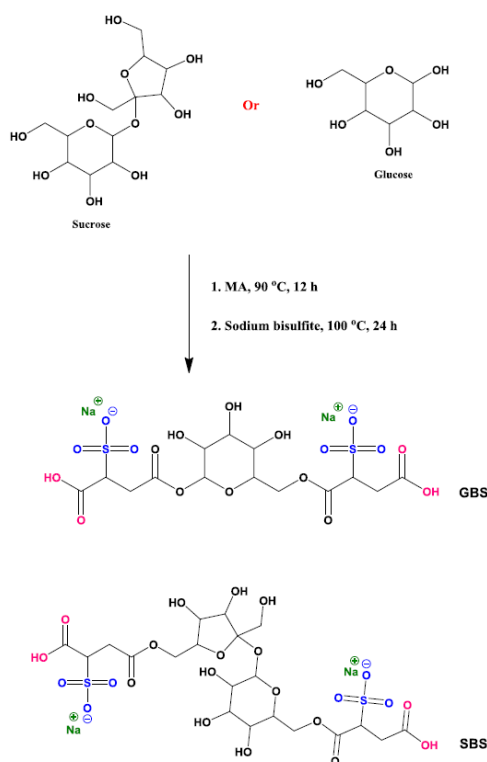


Рис. 1. Схема модификации глюкозы и сахарозы

Литература

1. Kelland M.A. Production Chemicals for the Oil and Gas Industry // CRC Press. – 2014.
2. Kelland M.A. History of the Development of Low Dosage Hydrate Inhibitors // Energy Fuels. – 2006. – Vol. 20. – Pp. 825–847.
3. Farhadian A., Varfolomeev M.A., Kudbanov A., Gallyamova S.R. A New Class of Promising Biodegradable Kinetic/Anti-Agglomerant Methane Hydrate Inhibitors Based on Castor Oil // Chemical Engineering Science. – 2019. – Vol. 206. – Pp. 507–517.
4. Qasim A., Khan M.S., Lal B., Shariff A.M. A Perspective on Dual Purpose Gas Hydrate and Corrosion Inhibitors for Flow Assurance // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2019. – Vol. 183. – No. 106418.

НОВЫЙ ПРОМОТОР ГИДРАТООБРАЗОВАНИЯ НА ОСНОВЕ СУЛЬФИРОВАННОГО КАСТОРОВОГО МАСЛА

Варфоломеев М. А.¹, Павельев Р. С.¹, Стопорев А. С.¹, Семенов М. Е.^{1, 3},
Зарипова Ю. Ф.¹, Ярковой В. В.¹, Фархадян А.¹, Валиуллин Л. Р.²

¹ Казанский (Приволжский) федеральный университет
Казань, Россия

² Федеральный центр токсикологической, радиационной и биологической безопасности, Казань, Россия

³ Институт проблем нефти и газа СО РАН
Якутск, Россия

Аннотация. Создан новый биоразлагаемый нефтепромысловый реагент – сульфированное касторовое масло, содержащее в своем составе фрагменты как природного соединения (триглицерид рицинолевой кислоты), так и сульфокислоты. Данное соединение обладает способностью эффективно промотировать образование газовых гидратов и снижает стабильность пены при их разложении.

Abstract. A new biodegradable oilfield reagent has been designed. It is sulfonated castor oil, which contains fragments of both a natural compound (triglyceride of ricinoleic acid) and sulfonic acid. This compound promotes the formation of gas hydrates effectively as well as reduces foam stability during hydrate decomposition.

Данная работа направлена на решение ряда проблем, актуальных для условий России (северные и арктический регионы), таких как транспортировка и хранение газа, включая попутный нефтяной газ, и сохранение хрупкой арктической природы. Ключевым параметром здесь являются суровые климатические условия, благоприятные для внедрения газогидратных технологий.

На сегодняшний день известны несколько подходов в решении задачи транспортировки и хранения газа. Наиболее распространенным из них является трубопроводный транспорт, который не всегда практичен, учитывая расстояние до места назначения и его доступность. В качестве другого известного подхода к транспортировке и хранению газа можно обозначить технологию сжатого природного газа. Недостатками этого подхода являются проблемы безопасности и низкая емкость хранилищ. Адсорбированный природный газ – это еще одно возможное решение проблемы транспортировки и хранения газа. В качестве сорбентов здесь применяются углеродные нанотрубки, графен, металлоорганические каркасы и т. д. Однако, такие факторы, как механическая стабильность, теплопроводность, наличие примесей и, самое главное, высокая стоимость материала сорбента препятствуют развитию данной технологии в промышленном масштабе. Транспортировка природного газа в сжиженном виде (СПГ) считается приемлемым подходом для крупномасштабных и дальних перевозок, однако данная технология требует очень низких температур ($-162\text{ }^{\circ}\text{C}$) и сталкивается с проблемой постоянного выкипания газа, что накладывает ограничения на время хранения.

Газовые гидраты представляют собой класс соединений включения, в которых пористый кристаллический каркас образован молекулами воды, а молекулы газов заполняют поры этого каркаса. Хранение и транспортировка природного газа в форме клатратных гидратов (далее – гидратов) на сегодняшний день является многообещающей альтернативой рассмотренных выше технологий [1] из-за некоторых характерных преимуществ, рассмотренных ниже. 1) Процесс образования газового гидрата является экологичным, поскольку в нем участвуют только вода, газ и очень малая доля промотора (в случае использования промотора); 2) Гостевой газ легко извлекается из гидрата путем снижения давления или минимального нагрева; 3) Умеренные значения температуры и давления, необходимые для формирования и хранения гидрата; 4)

Сравнительно высокая скорость связывания газа в гидратное состояние (при наличии промотора в низкой концентрации); 5) Относительно высокое содержание энергии на единицу объема; 6) Возможность хранения и транспортировки достаточно широкого круга газов/возможность их частичного разделения непосредственно в процессе гидратообразования; 7) Данный способ хранения газа является безопасным, поскольку газогидраты не относятся к взрывоопасным веществам [2]. Для реализации данной технологии требуется решить такие вопросы, как эффективное снижение адгезии гидратов к внутренним поверхностям технологических аппаратов, уменьшение окклюзии воды образующейся гидратной массой, управление кинетикой образования и разложения гидратов и пр. [3]. Перспективным подходом здесь может быть использование веществ, целенаправленно влияющих как на кинетику/термодинамику образования и разложения гидратов, так и на их физико-химические свойства. Например, для развития гидратных технологий транспортировки и хранения газа необходимо создание эффективных способов промотирования гидратообразования.

В данной работе проведены поиск и изучение новых промоторов гидратообразования на основе малых молекул, включая природные соединения, полимеров и модифицированных частиц. Выявлен ряд новых структур, ускоряющих процесс гидратообразования. Для лидерных соединений были описаны такие показатели, как токсичность *in vitro* на ряде клеточных линий, биodeградация, пенообразование и селективность связывания в гидрат таких газов как метан, этан, пропан, азот и углекислый газ. Установлено, что в присутствии разработанного реагента (сульфированного касторового масла) концентрацией 0.1 масс.% скорость роста гидрата метана сопоставима с данным показателем для известного промотора додецилсульфата натрия и примерно в 6 раз превосходит данное значение для чистой воды. При этом сульфированное касторовое масло превосходит додецилсульфат натрия в среднем в 3 раза по индукционному периоду (время до начала гидратообразования). Особо стоит отметить степень превращения воды в гидрат – 74 ± 8 , 61 ± 4 и $58 \pm 2\%$ для сульфированного касторового масла, додецилсульфата натрия и чистой воды соответственно. Таким образом, по всем рассмотренным показателям сульфированное касторовое масло превосходит один из самых известных промоторов – додецилсульфат натрия. Установлено, что сульфированное касторовое масло в 1.5–3.2 раза менее токсично, чем соединение сравнения – додецилсульфат натрия. Биodeградация сульфированного касторового масла на пятый день эксперимента составляет $16. \pm 0.6\%$, в то время как для соединения сравнения – додецилсульфата натрия – $10. \pm 0.6\%$. Следовательно, разработанный реагент является более биodeградируемым и безопасным для окружающей среды. Кроме того, новый нефтепромысловый реагент на основе касторового масла, содержащий в своем составе как фрагмент природного соединения (триглицерид рицинолевой кислоты), так и фрагмент сульфокислоты обладает низкой токсичностью и эффективно снижает стабильность пены при разложении гидратов (по сравнению с додецилсульфатом натрия).

Работы проведены за счет средств федерального бюджета в процессе выполнения проекта при поддержке Минобрнауки России в рамках соглашения № 075-15-2020-931 о предоставлении гранта в форме субсидий из федерального бюджета на осуществление государственной поддержки создания и развития научного центра мирового уровня «Рациональное освоение запасов жидких углеводородов планеты».

Литература

1. Патент РФ 2443851C1 Комплекс оборудования для отработки газовых месторождений.
2. Veluswamy H.P., Kumar A., Seo Y., Lee J.D., Linga P. A review of solidified natural gas (SNG) technology for gas storage via clathrate hydrates // *Applied Energy*. – 2018. – Vol. 216. – Pp. 262–285,
3. Кузнецов Ф.А., Истомин В.А., Родионова Т.В. Газовые гидраты: исторический экскурс, современное состояние, перспективы исследований // *Российский химический журнал (Журнал Российского химического общества им. Д.И. Менделеева)*. – 2003. – Т. XLVII, № 3, С. 5-18.

РАЗРАБОТКА НОВЫХ БИФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ИНГИБИТОРОВ ГИДРАТООБРАЗОВАНИЯ И КОРРОЗИИ НА ОСНОВЕ ВОДОРАСТВОРИМЫХ ПОЛИУРЕТАНОВ

Варфоломеев М. А., Павельев Р. С., Стопорев А. С., Семенов М. Е., Зарипова Ю. Ф.,
Ярковой В. В., Фархадян А., Виноградова С. С.
Казанский (Приволжский) федеральный университет
Казань, Россия

Аннотация. Для борьбы с образованием газовых гидратов требуются недорогие, биodeградируемые реагенты. Представленные в данной работе полиуретаны могут быть практичным решением комплексных задач в нефтедобывающей отрасли, поскольку массовое производство полиуретанов освоено повсеместно. Данная работа посвящена изучению влияния строения молекул полиуретанов на их способность ингибировать гидратообразование и коррозию. Предлагаемые реагенты могут выступать в роли экологических добавок, снижающих массовую долю применяемой нефтехимической продукции.

Abstract. To prevent the formation of gas hydrates, inexpensive and biodegradable reagents are required. The polyurethanes presented in this work can resolve complex problems in the petrochemical industry, since the mass production of polyurethanes has been utilized everywhere. An effect of the structure of polyurethane molecules on the inhibition of hydrate formation and corrosion was studied in the current work. The proposed reagents can act as eco-friendly additives that reduce the mass fraction of the applied petrochemical products.

Газовые гидраты образуются при подходящих термобарических условиях во время добычи и транспортировки углеводородов в стволах скважин, трубопроводах и другом оборудовании. Газовые гидраты представляют собой класс соединений включения, в которых пористый кристаллический каркас образован молекулами воды, а молекулы газов заполняют поры этого каркаса [1]. Частицы гидрата могут агломерироваться, что приводит к закупорке трубопровода гидратной пробкой. Это препятствует стабильному потоку углеводородов, снижая эффективность транспортировки и увеличивая эксплуатационные расходы, а так же способствуя возникновению аварийных ситуаций [2]. Помимо этого, сероводород и диоксид углерода в присутствии воды способны вызывать коррозию трубопровода или других контактных стальных элементов, используемых при добыче, транспортировке, хранении и переработке углеводородов, что снижает срок их эксплуатации и также может приводить к авариям [3].

Данное исследование заключается в изучении взаимосвязи структура-свойства для новых ингибиторов на основе водорастворимых полиуретанов. Варьирование типа заместителя в N-алкилдиэтанолaminaх (метил, n-бутил, трет-бутил) позволило получить полимеры с различными целевыми свойствами (Рис. 1). Исследование эффективности ингибирования гидратообразования проводилось как в динамических, так и статических условиях. Реагенты на основе водорастворимых полиуретанов в динамических условиях продемонстрировали снижение относительного падения давления, увеличение достижимого переохлаждения (ΔT) и индукционного периода наравне с коммерческими реагентами. Показано, что синтезированные полиуретаны обладают свойствами ингибиторов комплексного действия, т. е. ингибируют как процессы гидратообразования, так и процессы коррозии. Увеличение эффективности ингибирования связано с повышением гидрофобности молекул. Полимеры с повышенным содержанием диэтанолaminовых фрагментов с n- или трет-бутиловым заместителем работали как ингибиторы двойного действия, демонстрируя почти такую же эффективность, как и коммерческие реагенты (LuviCap 55W) при низкой концентрации

плоского слоя льда. Проведено сравнение расчетных данных с известными экспериментальными данными по кинетике образования гидрата метана и гидрата диоксида углерода из ледяного порошка.

Abstract. Equations that describe the kinetics of gas hydrate formation from a spherical ice particle and the kinetics of gas hydrate formation from a flat ice layer are obtained. The calculated data are compared with available experimental data on the kinetics of formation of methane hydrate and carbon dioxide hydrate from ice powder.

При использовании ряда газогидратных технологий возникает потребность в кинетической модели образования газового гидрата из льда. Кроме того, такая потребность возникает при моделировании гидратообразования в природных условиях, например, при моделировании гидратообразования в многолетнемерзлых породах.

Из анализа процесса образования газового гидрата из льда следует, что кинетика данного процесса лимитируется только скоростью молекулярной диффузии газа через слой газового гидрата. Тогда, решая диффузионную задачу в слое газового гидрата в случае образования газового гидрата из сферической частицы льда при неизменных термобарических условиях, получим кинетическое уравнение вида [1]

$$1 - 3\left(\frac{R_i}{R_0}\right)^2 + 2\left(\frac{R_i}{R_0}\right)^3 = \frac{6DM_h\Delta c t}{R_0^2\rho_h}, \quad (1)$$

а, решая диффузионную задачу в слое газового гидрата в случае образования газового гидрата из плоского слоя льда при неизменных термобарических условиях, получим кинетическое уравнение вида [1]

$$L_i = L_0 - \sqrt{2D\frac{M_h}{\rho_h}\Delta c t}. \quad (2)$$

Здесь R_i – текущий радиус сферического ледяного ядра; R_0 – начальный радиус сферической частицы льда; D – коэффициент молекулярной диффузии газа в газовом гидрате; M_h – молярная масса газового гидрата; Δc – движущая сила процесса образования газового гидрата из льда; t – время; ρ_h – массовая плотность газового гидрата; L_i – текущая толщина плоского слоя льда; L_0 – начальная толщина плоского слоя льда. В уравнениях (1) и (2) движущая сила $\Delta c = c_{\text{out}} - c_{\text{eq}} = c_{\text{out}} - p_{\text{eq}} / Z_{\text{eq}} RT$, где c_{out} – молярная концентрация газа вне рассматриваемой сферической частицы или рассматриваемого плоского слоя; c_{eq} – равновесная молярная концентрация газа; p_{eq} – давление равновесия лед–гидрат–газ; Z_{eq} – фактор сжимаемости газа при равновесных термобарических условиях; R – газовая постоянная; T – температура. В случае, если образование газового гидрата из льда происходит в атмосфере гидратообразующего газа, то $\Delta c = p / ZRT - p_{\text{eq}} / Z_{\text{eq}} RT$, где p – давление газа; Z – фактор сжимаемости газа при текущих термобарических условиях.

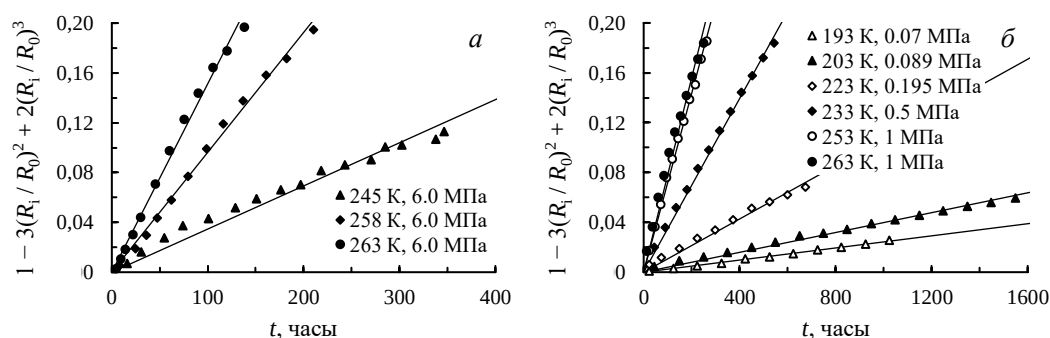


Рис. 1. Кинетика образования гидрата метана (а) и гидрата диоксида углерода (б) из ледяного порошка с $R_0 = 26$ мкм при различных термобарических условиях: символы – экспериментальные данные из работы [2] (а) и работы [3] (б); сплошные линии – линейные аппроксимации экспериментальных данных

Из уравнения (1) следует, что значение функции $1 - 3(R_i / R_0)^2 + 2(R_i / R_0)^3$ линейно увеличивается со временем. Уравнение (1) можно использовать для описания кинетики образования газового гидрата из ледяного порошка, т. е. для описания кинетики образования газового гидрата из большой совокупности частиц льда, форма которых близка к сферической. В этом случае следует считать, что радиус R_0 – это характерный средний радиус частиц льда, составляющих порошок. В работе [2] приведены экспериментальные данные по кинетике образования гидрата метана из ледяного порошка со средним радиусом частиц 26 мкм, полученные при различных температурах и давлении метана 6.0 МПа. В работе [3] приведены экспериментальные данные по кинетике образования гидрата диоксида углерода из ледяного порошка со средним радиусом частиц 26 мкм, полученные при различных температурах и различных давлениях диоксида углерода. На рис. 1 эти экспериментальные данные представлены в виде зависимостей значений функции $1 - 3(R_i / R_0)^2 + 2(R_i / R_0)^3$ от времени. Также на этом рисунке представлены линейные аппроксимации экспериментальных данных, полученные по методу наименьших квадратов. Из рис. 1 видно, что экспериментальные данные прекрасно описываются линейными зависимостями. Данный факт свидетельствует о том, что уравнение (1) и, как следствие, уравнение (2) являются корректными: с помощью этих уравнений можно моделировать кинетику образования газового гидрата из льда.

Зависимость коэффициента диффузии D от температуры подчиняется уравнению аррениусовского типа. Из сопоставления расчетных данных, полученных с помощью выражения (1), с экспериментальными данными из работ [2, 3] было установлено, что зависимость коэффициента молекулярной диффузии метана в гидрате метана от температуры имеет вид $D[\text{м}^2/\text{с}] = \exp(-12.8 - 6242/T[\text{K}])$, а зависимость коэффициента молекулярной диффузии диоксида углерода в гидрате диоксида углерода от температуры имеет вид $D[\text{м}^2/\text{с}] = \exp(-30.0 - 1179/T[\text{K}])$.

Исследование выполнено в рамках Программы фундаментальных исследований РАН (проект IX.135.2.) при финансовой поддержке РФФИ и Тюменской области (проект № 20-43-720002).

Литература

1. Vlasov V.A. Simplified diffusion model of gas hydrate formation from ice // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2021. – Vol. 165. – Article 120701.
2. Kuhs W.F., Staykova D.K., Salamatina A.N. Formation of methane hydrate from polydisperse ice powders // The Journal of Physical Chemistry B. – 2006. – Vol. 110, No. 26. – Pp. 13283–13295.

3. Falenty A., Salamatina A.N., Kuhs W.F. Kinetics of CO₂-hydrate formation from ice powders: data summary and modeling extended to low temperatures // The Journal of Physical Chemistry C. – 2013. – Vol. 117, No. 16. – Pp. 8443–8457.

МОЛЕКУЛЯРНО-ДИНАМИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ И СКОРОСТИ ОБРАЗОВАНИЯ ГАЗОВОГО ГИДРАТА ИЗ МОРСКОЙ ВОДЫ

Гец К. В.^{1, 2}, Жданов Р. К.^{1, 2}, Божко Ю. Ю.^{1, 2}, Белослудов В. Р.^{1, 2}

¹ Институт неорганической химии им. А. В. Николаева, СО РАН

Новосибирск, Россия

² Новосибирский государственный университет

Новосибирск, Россия

Аннотация. В данной работе рассмотрено влияние гетерогенной нуклеации на скорость образования газового гидрата при помощи метода молекулярной динамики. Показано, что добавление затравочных кристаллов гидрата пропана в смеси «морская вода + пропан» приводит к существенному снижению индукционного времени гидратообразования, что может повысить эффективность технологий опреснения морской воды и быть применено в различных регионах России и мира, где доступ к источникам пресной воды ограничен.

Abstract. The effect of heterogeneous nucleation on the rate of gas hydrate formation using the molecular dynamics method is considered in this work. It is shown that the addition of propane hydrate seed crystals in the mixture "seawater + propane" leads to a significant decrease in the induction time of hydrate formation, which can improve the efficiency of seawater desalination technologies and be applied in different regions of Russia and the world, where access to fresh water sources is limited.

Около 97.5% запасов воды на Земле составляет солёная вода морей и океанов и лишь 2.5% от всех доступных запасов воды могут быть использованы человеком. При этом около 69% этой воды образуют полярные и горные ледники. Остальная чистая вода представлена в виде грунтовых вод, рек, озёр и влаги в воздухе, и является доступной для человеческих нужд. Некоторые регионы России и мира не имеют доступа к этим источникам пресной воды в достаточной мере. Одним из способов опреснения морской воды является её заморозка, т. к. концентрация соли во льду существенно ниже. В процессе заморозки образуется рапа, остаточная вода, которая имеет повышенную концентрацию соли. Развитием такого способа опреснения морской воды является образование из морской воды клатратных гидратов (соединений включения, водный каркас которых имеет полости, в которых могут находиться молекулы газа). Преимуществом гидратообразования является возможность получать гидрат при температуре выше 0 °С в присутствии газа. Как и в случае со льдом, растворённые в воде ионы соли не попадают в структуру гидрата, а высвобожденный после его плавления газ можно использовать повторно.

Одной из важных проблем газогидратного способа опреснения морской воды является высокое индукционное время гидратообразования. Большинство исследований направлены на решение этой проблемы в рамках гомогенной нуклеации газовых гидратов. В данной работе проводится изучение влияния гетерогенной нуклеации на скорость роста гидратов из солёной воды при помощи метода молекулярной динамики. Для этого в растворы «вода + ионы солей + пропан» и «вода + пропан» помещаются затравки гидрата пропана (кубическая структура II, молекулы пропана в одночастичном приближении находятся в только больших полостях). Пропан был выбран благодаря низкому давлению гидратообразования, низкому уровню опасности для здоровья человека и высокой стабильности при взаимодействии с водой. Изучение процесса гетерогенного гидратообразования велось в области температур 260–280 К и давлений 0.1–5 МПа. Концентрация морской соли соответствовала реальным значениям.

Было показано, что наличие затравки существенно снижает индукционного время, однако при уменьшении размера затравочных кристаллов до единиц нанометров наблюдается разложение затравочного фрагмента.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Министерства по науке и технологиям Тайваня в рамках научного проекта № 21-52-52001 МНТ_а.

УДК 669.162.263.222:519.63

ОСОБЕННОСТИ РАЗЛОЖЕНИЯ ГАЗОВЫХ ГИДРАТОВ ТЕПЛОМ ВОЗДЕЙСТВИЕМ

Давлетшина М. Р., Столповский М. В., Чиглинцева А. С.
Уфимский государственный нефтяной технический университет
Уфа, Россия

Аннотация. В работе представлена математическая модель диссоциации гидрата метана при тепловом воздействии на пористый пласт. Рассмотрена задача воздействия теплового источника (горячей жидкости) на пористый пласт конечной длины, изначально насыщенный гидратом метана. Построены распределения температуры в системе в различные моменты времени. Исследовано влияние температуры теплового источника на характер движения границы фазового перехода.

Abstract. The paper presents a mathematical model of dissociation of methane hydrate under thermal influence on a porous layer. The problem of influence of a heat source (hot liquid) on a porous layer of finite length initially saturated with methane hydrate is considered. Temperature distributions in the system at different times are constructed. The influence of the heat source temperature on the character of the phase transition boundary motion is investigated.

Разработка газогидратный залежей и добыча газа из газогидрата является перспективной задачей. Это связано с широкой распространенностью газогидратных запасов в Мировом океане и в зоне вечной мерзлоты [1, 2]. Сегодня наиболее актуальными являются вопросы добычи газа при минимизации издержек и повышение эффективности технологий добычи газа [3–5].

В данной работе рассматривается задача о возможности добычи газа из газогидратного пласта при тепловом воздействии [6, 7]. Предложена технологическая схема, и на ее основе построена математическая модель, описывающая нагревание и одновременный отбор газа в комбинированную скважину, состоящую из двух соосных труб. По данной схеме в межтрубный канал подается теплоноситель, например, теплая вода, а внутренняя скважина сообщается с пластом и туда поступает образовавшийся при термическом воздействии, газ (рис.1). Рассматривается однородный пористый пласт, насыщенный в исходном состоянии гидратом метана.

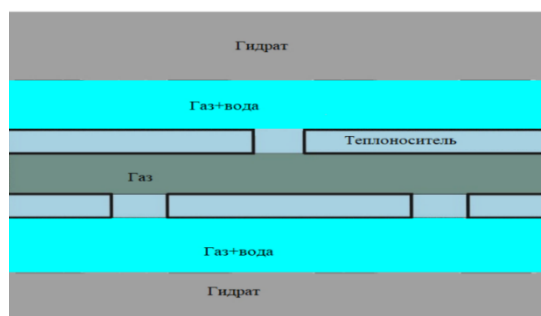


Рис. 1. Технологическая схема

Численным моделированием, а также на основе полученных аналитических решений данной математической модели исследовано влияние температуры теплоносителя и гидратонасыщенности пласта на характер движения фронта разложения и на выход газа. Проведен анализ эффективности предлагаемого способа добычи газа. В результате исследования установлено, что при пористости пласта не менее десяти процентов, коэффициент энергоэффективности составляет величину порядка десяти. Эффективность здесь характеризуется как отношение теплотворной способности добытого метана к энергозатратам на его извлечение. Причем, с увеличением гидратосодержания пласта эта величина растет. Например, при двукратном увеличении гидратосодержания пласта энергоэффективность растет примерно на десять процентов. Проведено численное решение исходной системы дифференциальных уравнений частных производных по явной схеме методом ловли фронта в узел пространственной сетки. В осесимметричной постановке с фронтальной границей фазовых переходов построены решения, характеризующие поля температур, динамику движения границы разложения и массового расхода газа. Сравнение численных решений с аналитическими показало, что они неплохо согласуются для малых времен.

В результате исследования получены решения, которые позволяют анализировать различные режимы теплового воздействия с точки зрения энергоэффективности добычи газа и целесообразности освоения таких залежей.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ МД-2179.2020.1.

Литература

1. Макогон Ю. Ф. Газогидраты. История изучения и перспективы освоения // Геология и полезные ископаемые Мирового океана. – 2010. – № 2. – С. 5-21.
2. Nair V.C., Gupta P., Sangwai J.S. Gas Hydrates as a Potential Energy Resource for Energy Sustainability // Sustainable Energy Technology and Policies. – 2018. – Vol. 1. – pp. 265-287.
3. Черский Н.В., Бондарев Э.А. О тепловом методе разработки газогидратных месторождений // Докл. АН СССР. – 1972. – Т. 203. – № 3. – С. 550-552.
4. Нигматулин Р. И., Шагапов В.Ш., Сыртланов В. Р. Автомодельная задача о разложении газогидратов в пористой среде при депрессии и нагреве // Прикладная механика и техническая физика. – 1998. – Т. 39. – № 3. – С. 111-118.
5. Шагапов В.Ш., Сыртланов В. Р., Галиакбарова Э.В. О разложении гидратов в пористой среде, заполненной гидратом и газом, при тепловом и депрессионном воздействии // Итоги исследований ИММС СО РАН. – Тюмень. – 1997. – № 7. – С. 140-151.
6. Шагапов В.Ш., Чиглинцева А. С., Сыртланов В. Р. О возможности вымывания газа из газогидратного массива посредством циркуляции теплой воды // Прикладная механика и техническая физика. – 2009. – Т. 50. – № 4. – С. 100-111.
7. Шагапов В.Ш., Давлетшина М. Р. К теории разработки гидратного пласта тепловым воздействием // Многофазные системы. 2019. Т. 14, № 4. С. 243–252.

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ СТАБИЛЬНОСТИ ГАЗОВЫХ ГИДРАТОВ В ПРИСУТСТВИИ МОРСКОЙ ВОДЫ

Жданов Р. К., Гец К. В., Божко Ю. Ю., Белослудов В. Р.

Институт неорганической химии им. А. В. Николаева, СО РАН, Новосибирск, Россия
Новосибирский Государственный Университет
Новосибирск, Россия

Аннотация. В представленной работе проведено исследование области стабильности гидратов пропана в равновесии с морской водой. Моделирование проводилось в рамках нового подхода, заключающегося в комбинировании оригинальной статистико-термодинамической модели соединений включений и молекулярной динамики. Показано, что данная методика позволяет получать достоверные данные не только об областях стабильности, но и о составе газовых гидратов.

Abstract. In the presented work the results of the stability region modeling for propane hydrates in equilibrium with sea water is presented. The very new modeling approach was used for calculation required properties. The approach is a combination of original statistical-thermodynamic model of inclusion compounds and classical molecular dynamic. It is shown that used approach allows one to obtain reliable data on the stability regions and on the composition of gas hydrates.

Пресная вода составляет лишь малую часть от общего запаса всей воды на нашей планете, при этом далеко не вся пресная вода доступна для хозяйственной деятельности человека. Из-за неравномерности ее распределения на территории нашей страны имеется ряд районов, где проблема доступа к чистой воде стоит особенно остро. В связи с чем методы опреснения морской воды получают все большее развитие. Одним из таких методов является способ при котором происходит образование льда из соленой воды с дальнейшим его плавлением. Усовершенствованием данного метода можно считать газогидратный способ опреснения, при котором из морской воды образуются газовые гидраты. При таком подходе возможна реализация процесса при положительных температурах, что, в свою очередь, способно значительно снизить энергетические затраты на опреснение.

В данной работе исследовалось образование гидратов пропана, как газа, имеющего крайне низкую растворимость в воде, что значительно упрощает моделирование. Для этого была использована статистико-термодинамическая теория соединений включения [1], которая позволяет рассчитывать физические и термодинамические свойства гидратов. Для расчета необходимых термодинамических параметров использовалась комбинация методов решеточной и классической молекулярной динамики. Чтобы определить наиболее стабильную фазу достаточно иметь данные химического потенциала молекул воды в различных фазах. Энергетические параметры, необходимые для получения химического потенциала в жидкой фазе, были найдены путем моделирования жидкой фазы методами молекулярной динамики, при этом количество и состав солей, растворенных в воде, соответствовал усредненным значениям для морской воды. Для описания газовой фазы пропана был использован неидеальный газ ван-дер-Ваальса. Было показано, что рассчитанная линия фазового перехода гидрат – чистая вода совпадает с экспериментальными данными. Добавление соли в воду смещает температуру образования гидрата на $\sim 4^\circ$, при использовании более длительного моделирования планируется увеличить точность расчетов. Используемый комбинированный подход методов молекулярной динамики и статистико-термодинамической теории соединений включения позволит быстро рассчитывать термодинамические равновесия с различными растворами.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и МНТ в рамках научного проекта № 21-52-52001 МНТ_а.

Литература

1. Subbotin O.S., Adamova T.P., Belosludov R.V., et al. Theoretical study of phase transitions in Kr and Ar clathrate hydrates from structure II to structure I under pressure // J. Chem. Phys. – 2009. – Vol. 131, No. 11. – P. 114507.

ГАЗОВЫЕ ГИДРАТЫ, ПРИУРОЧЕННЫЕ К ГЛУБОКОВОДНЫМ ГРЯЗЕВЫМ ВУЛКАНАМ

Жостков Р. А., Собисевич А. Л. чл.-корр. РАН, Суетнова Е. И.
Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН
Москва, Россия

Аннотация. Представлена математическая модель и результаты численного моделирования процесса накопления газогидратов в морском дне в зонах подводных грязевых вулканов. Модель описывает накопление газовых гидратов из растворённого в фильтрующемся к поверхности поровом флюиде. Численное моделирование показало, что скорость накопления гидратов в зонах грязевых вулканов в десятки и сотни раз больше, чем в осадочных бассейнах на пассивных континентальных окраинах.

Abstract. A mathematical model and the results of numerical simulation of the accumulation of gas hydrates in the seabed in the zones of underwater mud volcanoes are presented. The model describes the accumulation of gas hydrates from gas saturated pore fluid during its filtration to the sea bottom. Numerical simulations have shown that the rate of hydrate accumulation in mud volcano zones is tens and hundreds of times higher than in sedimentary basins on passive continental margins.

Газовые гидраты могут играть важную роль в глобальном углеродном цикле и глобальной климатической динамике через выбросы метана и влиять на стабильность геологических объектов, включая грязевые вулканы.

Роль газовых гидратов в вышеупомянутых процессах не может быть точно оценена без лучшего понимания процессов гидратонакопления в земной коре и их взаимодействия с геологическими особенностями и построения содержательных оценок возможного количества газовых гидратов и их эволюции. Следует отметить, что опасности, связанные с газовыми гидратами, требуют усилий по совершенствованию знаний о газовых гидратах и их взаимодействии с грязевыми вулканами. Недавние геофизические наблюдения (с использованием анализа поровых вод) в ряде зон с подводными грязевыми вулканами выявили признаки фильтрации газонасыщенных флюидов в окрестности вулканического жерла, а также геохимические признаки образования газогидратов в отложениях преимущественно из термогенного газа. Принимая во внимание эти данные наблюдений, можно предположить, что, помимо собственно вулканической активности в центре вулкана (в его вулканическом канале), поверхностно-направленная фильтрация газонасыщенного флюида происходит в центре вулкана. периферия, окружающая грязевой вулкан; флюид транспортируется в слой над отложениями, обладающий аномально высоким поровым давлением на определенной глубине и являющийся источником активности грязевого вулкана. За пределами вулканического жерла газонасыщенная жидкость, движимая более высоким давлением жидкости в резервуаре питания, фильтруется через пористые насыщенные проницаемые отложения к поверхности. В интервале глубин, где выполняются термобарические условия стабильности газогидратов, происходит накопление газогидратов из растворенного газа из фильтрующейся к поверхности осадков жидкости. Мы полагаем, что фильтрация через пористую среду над резервуаром питания грязевого вулкана слабо влияет на давление в резервуаре по сравнению с извержениями грязевого вулкана. Такой цикл фильтрации может функционировать между извержениями грязевых вулканов, в то время как сами извержения потенциально могут нарушать структуру отложений и распределение пористого давления в соответствующей среде и приводить к новому циклу фильтрации.

Мы представляем математическую модель и результаты численного моделирования процесса накопления газогидратов в морском дне в глубинных структурах под-

водных грязевых вулканов. Модель основана на представлении о фильтрации газонасыщенных поровых флюидов через зону термобарической стабильности газовых гидратов над резервуаром питания грязевого вулкана в окрестности жерла. (Собисевич, Суетнова, Жостков 2019). Нами было проведено количественное исследование того как глубина питающего резервуара и давление в нем могут влиять на эволюцию накопления газогидратов осаждающихся в интервале глубин термобарической стабильности газовых гидратов в осадках из фильтрующихся газонасыщенных флюидов над питающим вулкан резервуаром. Система дифференциальных уравнений 1–5 описывает этот процесс.

$$v(z,t) = -\frac{k}{\mu m} \left(\frac{\partial p_f(z,t)}{\partial z} - \rho_f g \right) \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho_f m}{\partial t} + \frac{\partial \rho_f v(z,t) m}{\partial z} = 0 \quad (2)$$

$$m \frac{\partial h(z,t)}{\partial t} = -\frac{\rho_f \nabla (mv(z,t)c_{eq})}{\rho_h c_h} \quad (3)$$

$$\frac{\partial m}{\partial t} = m_0 \frac{1}{K} \frac{\partial \rho_f}{\partial t} \quad (4)$$

$$\frac{\partial f}{\partial t} + A_1 \frac{\partial m \cdot V_f \cdot f}{\partial z} = \kappa \frac{\partial^2 f}{\partial z^2} \quad (5); \quad A_1 = \frac{\rho_f \cdot C_f}{\rho C}$$

Здесь использованы обозначения: m – пористость; ρ_f – плотность флюида; ρ_h – плотность гидрата; k – проницаемость осадков, являющаяся функцией пористости, $k = k_0 m^3$; μ – вязкость флюида; f – температура; C – теплоемкость; g – ускорение силы тяжести; K – коэффициент сжимаемости пористой среды; h – гидратонасыщенность; t – время; z – пространственная координата; v – скорость флюида; c_{eq} – концентрация газа в насыщающем флюиде в условиях присутствия гидрата газа; c_h – концентрация газа в гидрате; p_f – давление флюида. Для локализации зоны стабильности гидратов в зависимости от давления и температуры использовались известные зависимости. Численное моделирование с использованием типичных значений входящих параметров (рис. 1) показало, что насыщение гидратами в зонах подводных грязевых вулканов не является постоянным и на его эволюцию влияют геофизические свойства дна (градиент температуры, пористость, проницаемость и физические свойства осадка), а также глубина питающего резервуара и давление в нем, причем скорость накопления гидратов в десятки и сотни раз больше, чем в осадочных бассейнах на пассивных континентальных окраинах.

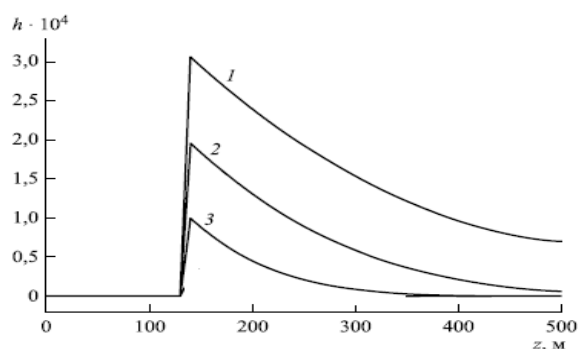


Рис. 1. Гидратонасыщенность через 1 год после начала фильтрации для различных значений проницаемости осадков (1) $k=10^{-13} \text{ м}^2$, (2) $k=10^{-13,5} \text{ м}^2$ (3) $k=10^{-14} \text{ м}^2$. Глубина питающего резервуара 500м
Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 18-05-70034

Литература

1. Собисевич А. Л., Суетнова Е. И., Жостков Р. А. Эволюция газогидратных скоплений в зонах глубоководных грязевых вулканов // Вулканология и сейсмология. — 2019. — № 2. — С. 45–51.

ПОРОВАЯ СТРУКТУРА ГАЗОГИДРАТА ФРЕОНА-12

Заводовский А. Г.¹, Мадыгулов М. Ш.¹, Рогов В. В.^{1, 2}

¹ Институт криосферы Земли ТЮМНЦ СО РАН

Тюмень, Россия

² МГУ имени М. В. Ломоносова

Москва, Россия

Аннотация. Представлены результаты анализа микрофотографий поверхности объемных образцов газогидрата фреона-12, полученных с помощью электронной микроскопии. Установлено наличие макропор у исследуемого газогидрата. Показано, что они распределены по поверхности образца газогидрата неравномерно. Сделана оценка их среднего размера и пористости газогидрата фреона-12. Отмечена частичная корреляция полученных результатов с данными ЯМР измерений.

Abstract. The results of the analysis of micrographs of the surface of bulk samples of freon-12 gas hydrate obtained using electron microscopy are presented. The presence of macropores in the investigated gas hydrate was established. It is shown that they are distributed unevenly over the surface of the gas hydrate sample. An estimate of their average size and porosity of freon-12 gas hydrate is made. Partial correlation of the obtained results with the data of NMR measurements was noted.

Макропоры и мезопоры у газогидрата фреона-12 впервые были обнаружены импульсным методом ЯМР при использовании дисперсных образцов, полученных на основе молотого льда [1]. При этом остался открытым вопрос о плотности распределения этих пор, пористости газогидрата, а также наличия пор у образцов газогидрата, полученных на основе объемного льда.

В данной работе для получения ответов на эти вопросы анализировали микрофотографии поверхности объемных образцов газогидрата фреона-12 со степенью перехода льда в газовый гидрат $P_g = 56\%$. Микрофотографии получали с помощью сканирующего электронного микроскопа Hitachi TM3000 на основе реплик, изготовленных с поверхности образцов исследуемого газогидрата, т.к. непосредственное нахождение газогидрата фреона-12 в рабочей камере электронного микроскопа при комнатной температуре и абсолютном давлении от 0,13 Па до 600 Па привело бы к его быстрому разрушению.

В качестве препарата для получения реплик использовали 2 % раствор полиметилакрилата в дихлорэтаноле [2]. Реплики поверхности газогидрата фреона-12 получали в атмосфере воздуха при температуре 255 К. Для этого из предварительно охлажденного реактора, находящегося при температуре 255 К в воздушной морозильной камере, извлекали образец газогидрата и быстро наносили на его поверхность слой охлажденного до 255 К препарата. Последующая полимеризация препарата производилась в морозильной камере при температуре 255 К и атмосферном давлении воздуха.

На рис. 1. в качестве примера представлены характерные микрофотографии поверхности образцов газового гидрата фреона-12. Визуальный анализ полученных микрофотографий показывает, что у исследуемого газогидрата имеются поры со средним размером ~ 200 нм, что, согласно классификации IUPAC, соответствует размерам макропор. Следует отметить, что эти данные несколько отличаются от данных, полученных с использованием метода ЯМР [1], где у газогидрата фреона-12 наряду с макропорами были обнаружены также и мезопоры.

Согласно полученным данным макропоры по поверхности образцов газогидрата фреона-12 распределены неравномерно (рис. 1). Установлено, что в среднем на площадь поверхности газогидрата фреона-12 в 100 мкм² приходится на различных участках от 23 до 106 макропор, что соответствует пористости газогидрата фреон-12 0,7% и 3,3 % соответственно. Величина этой пористости заметно ниже пористости гидратов CH₄, Ar, N₂ и CO₂, полученных из дисперсного льда [3, 4]. Гидраты этих газов

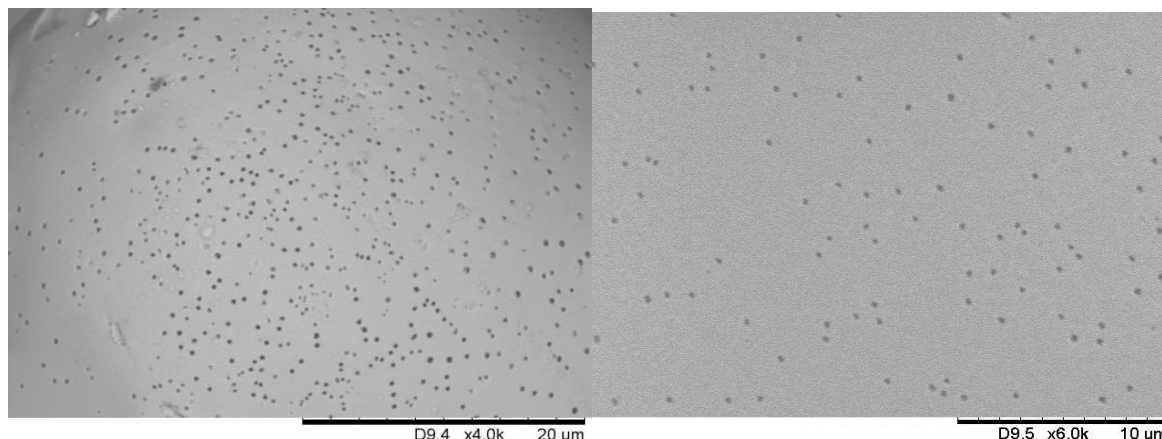


Рис. 1. Микрофотографии поверхности объемного образца газогидрата фреона-12

представляют собой разветвленную пористую структуру, состоящую из макро и мезо пор, и их пористость может достигать порядка 45 %. При этом для газогидратов CH₄, Ar и N₂ размеры пор, полученных с использованием электронного микроскопа Zeiss LEO 1530 Gemini (FE-SEM), варьируются в пределах от 100 нм до 400 нм, а для газогидрата CO₂ от 20 нм до 100 нм [3, 4].

Наблюдаемая в данной работе низкая плотность макропор и отсутствие мезопор в исследуемых образцах газогидрата фреона-12 может быть связана с использованием образцов газогидрата, полученных на основе объемного льда. Также это может быть связано с ограничениями методики реплик применительно к исследованию газовых гидратов при низких температурах. В частности, повышение вязкости используемого для получения реплик препарата может затруднять его проникновение в поры малого размера (мезопоры). Не исключено, что в исследуемых образцах мезопоры и часть макропор заросли коркой газогидрата со стороны газовой фазы. В результате они хорошо отслеживаются с помощью метода ЯМР спектроскопии, но не отражаются на получаемых репликах.

Следует ожидать, что наличие пористой структуры у газогидрата фреона-12 может привести к появлению особенностей его поведения в области метастабильных состояний и сказаться, в частности, на кинетике диссоциации исследуемого газогидрата ниже линии фазового равновесия “переохлажденная вода-гидрат-газ”.

Исследования выполнены в рамках Программы фундаментальных исследований РАН проект (IX.135.2.) при финансовой поддержке РФФИ и Тюменской области (проект №20-43-720002).

Литература

1. Власов В. А., Заводовский А. Г., Мадыгулов М. Ш. и др. Исследования импульсным методом ЯМР метастабильной воды, образованной при диссоциации фреонгидрата-12 в области отрицательных температур//Материалы Четвертой конференции геокриологов России. МГУ имени М. В. Ломоносова, 7–9 июня 2011 г. – Т.1. – С. 5–7.
2. Рогов В. В., Курчатова А. Н. Способ изготовления реплик для исследования микростроения мерзлых пород в растровом электронном микроскопе. Патент РФ 2528256 С1. МПК G01N, 1/28, (2006.01).

3. Staykova D.K., Kuhs W.F., Salamatina A.N. Hansen T. Formation of porous gas hydrates from ice powders: Diffraction experiments and multistage model // Journal of Physical Chemistry B. – 2003. – Vol. 107, No 37. – Pp.10299-10311.
4. Kuhs W.F., Klapproth A., Gotthardt F. The formation of meso- and macroporous gas hydrates // Geophysical research letters. – 2000. – Vol. 27, No 18. – Pp. 2929-2932.

ОБРАЗОВАНИЕ ГАЗОВЫХ ГИДРАТОВ ИЗО ЛЬДА В ПРИСУТСТВИИ ПОЛИВИНИЛПИРРОЛИДОНА

Заводовский А. Г., Мадыгулов М. Ш.
Институт криосферы Земли ТЮМНЦ СО РАН
Тюмень, Россия

Аннотация. Представлены результаты исследований по влиянию поливинилпирролидона на кинетику образования газового гидрата фреона-12. На основе данных P - V - T измерений рассчитана степень превращения льда в газовый гидрат при различных концентрациях поливинилпирролидона. Установлен факт сохранения ингибирующих свойств поливинилпирролидона при образовании газового гидрата фреона-12 на основе замороженных водных растворов, а так же проявление промотирующих свойств, что приводит к увеличению скорости роста гидрата на основе модифицированного льда.

Abstract. Presented the results of studies influence of polyvinylpyrrolidone on kinetics of formation freon-12 gas hydrate. On based the P - V - T measurements degree of conversion of ice to gas hydrate at various concentrations of polyvinylpyrrolidone was calculated. The fact of preservation of the inhibitory properties of polyvinylpyrrolidone in formation of the freon-12 gas hydrate on the basis of frozen aqueous solutions, as well as promoting properties, which leads to an increase in growth rate of a hydrate of a modified ice.

На сегодняшний день кинетика гидратообразования газов из водных растворов ПВП исследована достаточно хорошо. Известно, что присутствие ПВП в растворах увеличивает индукционный период гидратообразования и скорость роста газовых гидратов [1]. Однако при этом остался открытым вопрос влияния ПВП на кинетику гидратообразования при нахождении его в замороженных водных растворах.

Для ответа на данный вопрос были проведены исследования по кинетике образования газогидрата фреона-12 из молотого мелкодисперсного льда со средним размером частиц ~ 150 мкм, полученных путем механического размалывания замороженных водных растворов ПВП с массовой концентрацией от 0,05 % до 1,25 % (модифицированный лед). В качестве гидратообразующего газа использовали фреон-12 (CCl_2F_2) со степенью чистоты 99,7 %. Исследования кинетики гидратообразования производили на экспериментальной установке с использованием метода P - V - T измерений в режиме изотермического выстаивания исследуемых образцов (начальные условия: $T = 263$ K = const, $P_0 = 150$ кПа) в течение 110 минут. В течении этого времени периодически фиксировали величину падения давления газа в реакторе и на основе этих данных определяли степень перехода льда в газовый гидрат [2].

На рис. 1 представлены экспериментальные данные динамики роста исследуемого газогидрата в зависимости от концентрации ПВП. Видно, что процесс формирования газогидрата фреона-12 из модифицированного полимером льда происходит по многостадийному механизму и интенсивность роста газогидрата зависит от концентрации ПВП. Обнаружено, что начальный этап образования газового гидрата фреона-12 из модифицированного льда, в отличие от "чистого" льда, характеризуется наличием индукционного периода начала гидратообразования T_{ind} . Так как $T_{ind} \neq 0$, то этот

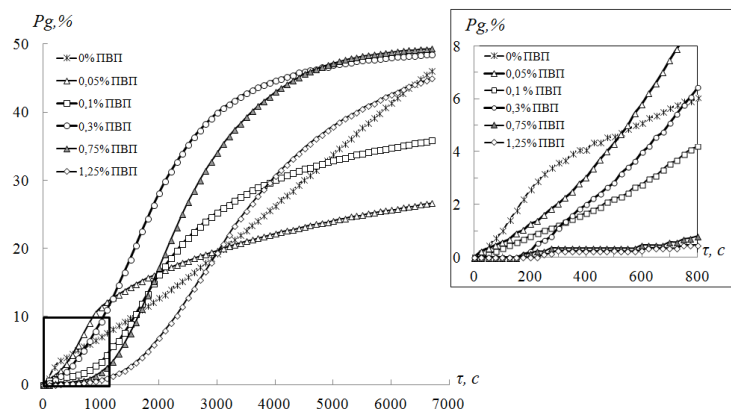


Рис. 1. Динамика роста степени превращения льда в газовый гидрат фреона-12 в зависимости от концентрации ПВП

факт, несомненно, свидетельствует о сохранении ингибирующих свойств ПВП при нахождении его в замороженных водных растворах. Установлено, что величина этого периода линейно увеличивается с ростом концентрации ПВП в исследуемом диапазоне концентраций (рис. 2).

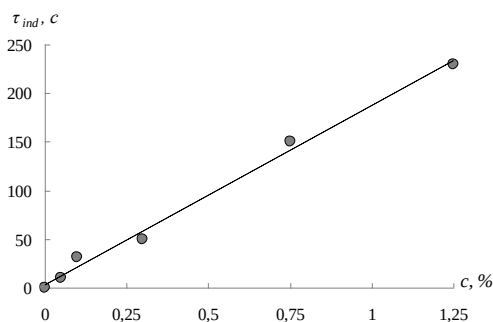


Рис. 2. Увеличение индукционного периода гидратообразования с ростом концентрации ПВП.

После образования зародышей газогидрата наблюдается стадия его активного роста в результате массовой кристаллизации, которая отмечается практически постоянной и относительно высокой скоростью роста (рис. 1). При этом следует отметить, что на стадии активного роста модифицированный полимером лед, по сравнению с "чистым" льдом, в течение длительного времени характеризуется более высокой скоростью роста. Величина этой скорости достигает максимального значения при концентрации ПВП $\sim 0,3$ %. При последующем увеличении концентрации ПВП отслеживается тенденция уменьшения скорости роста исследуемого газогидрата.

дуемого газогидрата.

Известно [3,4], что в замороженных водных растворах ПВП, вода находится в различных агрегатных состояниях. При этом часть ее находится в состоянии льда, а другая часть связана в различной степени молекулами ПВП, вокруг которых формируются соответствующие гидратные оболочки (слои с различной степенью связанности молекул воды), в которых вода не замерзает даже при очень низких температурах. Исходя из этого, можно предположить, что причина относительно низких значений P_g при концентрациях ПВП $\leq 0,1$ % связана, по всей видимости, с ростом газогидрата преимущественно на основе льда, т.к. при этом количество незамерзшей воды, способной активно участвовать в процессе гидратообразования, незначительно. При концентрации ПВП $\leq 0,3$ % активность роста газогидрата фреона-12 возрастает, что вероятнее всего связано с увеличением общего количества незамерзшей воды, локализованной, в частности, в гидратных оболочках молекул полимера. Следует отметить, что при концентрации ПВП $> 0,3$ % отслеживается тенденция уменьшения значений P_g . Предположительно это может являться следствием частичного перекрытия солевых оболочек молекул ПВП, что в конечном итоге уменьшает количество незамерзшей воды, способной участвовать в процессе роста исследуемого газогидрата.

Исследования выполнены в рамках Программы фундаментальных исследований РАН проект (IX.135.2.) при финансовой поддержке РФФИ и Тюменской области (проект №20-43-720002).

Литература

1. Sloan E.D., Koh C.A. Clathrate Hydrates of Natural Gases. (3rd). CRC Press, Boca Raton; London; New York, 2008, – 721 p.
2. Заводовский А. Г., Мадыгулов М. Ш., Щипанов В.П. Кинетика образования и роста газовых гидратов на основе модифицированного льда // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ . – 2017. – № 6. – С. 117–122.
3. Кирш Ю.Э., Януль Н.А., Карапутадзе Т.М., Тимашев С.Ф. Особенности плавления замороженных водных растворов поли-N-виниламидов // Журнал физическая химия, – 1992, – т. 66, № 10, – С. 2629–2633.
4. Jellinek H.H.G., Fok S.Y. Freezing of aqueous polyvinylpyrrolidone solutions // Kolloid-Zeitschrift und Zeitschrift für Polymere, – 1967, – Vol. 220, No 2, – Pp. 122–133.

ПОЛУЧЕНИЕ ГАЗОВЫХ ГИДРАТОВ С ПОМОЩЬЮ ВОДНЫХ ДИСПЕРСНЫХ МАТЕРИАЛОВ, СТАБИЛИЗИРОВАННЫХ ГИДРОФОБНЫМИ НАНОЧАСТИЦАМИ

Поденко Л. С.¹, Драчук А. О.¹, Молокитина Н. С.^{1, 2}, Нестеров А. Н.¹

¹ Федеральный научный центр Тюменский научный центр СО РАН,
Институт Криосферы Земли
Тюмень, Россия

² Казанский (Приволжский) Федеральный Университет
г. Казань, Россия

Аннотация. Исследование посвящено изучению образования гидрата метана в новом водном дисперсном материале, стабилизированном гидрофобными наночастицами, – порошковом криогеле поливинилового спирта (ПК ПВС). Изучен характер влияния состава ПК ПВС на морфологию образованных в нем гидратов метана и стабильность ПК ПВС в циклах гидратообразования/диссоциации. Показано, что гидраты метана, полученные в ПК ПВС, представляют собой преимущественно сыпучий порошок, вне зависимости от концентрации стабилизатора. Увеличение содержания ПВС и стабилизатора в ПК ПВС приводит к росту их устойчивости к повторным циклам гидратообразования/диссоциации.

Abstract. The work is devoted to study the methane hydrate formation process into new water dispersed material called powdered poly(vinyl alcohol) cryogel (PPVACG), stabilized with hydrophobic silica nanoparticles. The effect of PPVACG composition on morphology of natural gas hydrates formed in it during multiple gas hydrate formation/dissociation cycles. It was shown that methane hydrates formed in PPVACGs have the appearance of free-flowing powder irrespective of the stabilizer concentration. The increase of PVA and stabilizer concentrations in PPVACGs leads to enhance of their stability and resistance in multiple gas hydrate formation/dissociation cycles.

Хранение и транспортировка природного газа в виде газовых гидратов в настоящее время рассматривается как возможная альтернатива трубопроводному газу и сжиженному природному газу. Основными препятствиями масштабного использования газовых гидратов в промышленности являются низкая скорость гидратообразования, невысокая степень перехода воды в гидрат (отношение количества воды, перешедшей в гидрат к исходному количеству воды). Было показано на примере “сухой воды”, что с помощью водных дисперсных материалов, стабилизированных гидрофобными наночастицами (частицами стабилизатора), можно получать газовые гидраты с высокой скоростью и степенью перехода воды в гидрат [1, 2]. “Сухая вода” представляет собой сыпучий порошок, содержащий до 98 мас.% воды в виде микро-

капель. Частицы стабилизатора, образующие газопроницаемый каркас, препятствующий слиянию капель воды, заполняют пространство между каплями дисперсной фазы “сухой воды” [2, 3]. Благодаря большой удельной поверхности гидратообразование в “сухой воде” протекает с высокой скоростью и степенью перехода воды в гидрат. Однако степень перехода воды в гидрат значительно снижается при повторном использовании “сухой воды” [1, 2]. Это происходит из-за того, что процессы кристаллизации гидрата и последующей его диссоциации при проведении циклов гидратообразования/диссоциации приводят к слиянию части капель дисперсной фазы “сухой воды” и разделению “сухой воды” на слои с образованием объемной водной фазы. “Сухую воду” получают путем смешивания с высокой скоростью воздуха с обычной водой и частицами стабилизатора [3]. Получены производные “сухой воды” – свободнотекучие порошки “сухой гели” и “гелеобразный сухой раствор”, обладающие большей стабильностью при проведении повторных циклов гидратообразования/диссоциации чем “сухая вода” [2, 4]. Дисперсная фаза производных “сухой воды” преимущественно образована микрокаплями водо-полимерного геля. “Сухой гели” получают быстрым смешиванием воздуха с водой, стабилизатором и добавкой водорастворимого анионного полисахарида. Добавка водорастворимого полимера увеличивает стабильность в циклах гидратообразования/диссоциации, но степень перехода воды в гидрат значительно снижается. Для получения “гелеобразного сухого раствора” вместо воды используется водный раствор анионного поверхностно-активного вещества (додицилсульфат натрия). Наличие в воде додицилсульфат натрия приводит к увеличению степени перехода её в гидрат, но при проведении более четырех циклов гидратообразования/диссоциации значительно увеличивается время индукции гидратообразования. Недавно получен новый водный дисперсный материал, стабилизированный гидрофобными наночастицами, – порошковый криогель поливинилового спирта (ПК ПВС). ПК ПВС получен из замороженного водного раствора поливинилового спирта (ПВС) путем его измельчения с добавлением гидрофобных наночастиц и последующего оттаивания [5]. Известно, что криогенная обработка (умеренное замораживание, затем хранение в замороженном состоянии и последующее оттаивание) водных растворов ПВС приводит к образованию структурированных полимерных систем, так называемых криогелей [6]. В отличие от производных “сухой воды” частицы дисперсной фазы ПК ПВС преимущественно состоят из макропористых полимерных частиц, содержащих воду в порах. Установлено, что скорость и степень перехода воды в гидрат для ПК ПВС может быть не меньше, чем для “сухой воды” и её производных”. При этом образцы ПК ПВС показывают большую стабильность в повторяющихся циклах гидратообразования/диссоциации [7]. Это свидетельствует о перспективности применения ПК ПВС для получения газовых гидратов. Ранее, на примере “сухой воды”, показано, что морфология и свойства газовых гидратов, полученных в водных дисперсных материалах, могут в сильной степени зависеть от содержания стабилизатора [8]. Так гидраты метана, полученные в “сухой воде” с содержанием стабилизатора не более 5 мас. %, представляют собой преимущественно сплошное твердое тело. При содержании стабилизатора в “сухой воде” 10 мас. % основная часть образца гидрата имеет вид сыпучего порошка. Отсутствие данных о влиянии состава ПК ПВС на морфологию образованных в них газовых гидратов и стабильность ПК ПВС в циклах гидратообразования/диссоциации сдерживает возможное применение ПК ПВС в газогидратных технологиях. Целью представленной работы было изучение влияния состава ПК ПВС на морфологию образованных в них гидратов метана и стабильность ПК ПВС в циклах гидратообразования/диссоциации.

В результате проведенного исследования показано:

- гидраты метана, полученные в ПК ПВС, содержащих ПВС 5 и 7 мас.%, представляют собой преимущественно порошок вне зависимости от концентрации стабилизатора (в диапазоне от 2 до 7 мас. %);
- увеличение содержания ПВС и стабилизатора в ПК ПВС приводит к росту их устойчивости к повторным циклам гидратообразования/диссоциации.

Полученные результаты о влиянии состава ПК ПВС на морфологию образованных в них газовых гидратов и на стабильность ПК ПВС в циклах гидратообразования/диссоциации будут способствовать установлению оптимального состава ПК ПВС для применения в газогидратных технологиях.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 20-43-72002.

Литература

1. Wang W., Bray C.L., Adams D.J., and Cooper A.I. Methane storage in dry water gas hydrates. J. Amer. Chem. Soc. 2008. V. 130. P. 11608-11609.
2. Carter B.O., Wang W., Adams D.J., and Cooper A.I. Gas storage in "Dry Water" and "Dry Gel" clathrates. Langmuir. 2010. V. 26. P. 3186-3193.
3. Binks B.P., Murakami R. Phase inversion of particle-stabilized materials from foams to dry water. Nature Materials. 2006. V. 5. P. 865-869.
4. Yang L., Lan X., Liu D., Cui G., Dou B., and Wang J. Multi-cycle methane hydrate formation in micro droplets of gelatinous dry solution. Chem. Eng. J. 2019. V. 374. P. 802-810.
5. Melnikov V.P., Podenko L.S., Nesterov A.N., Molokitina N.S., Drachuk A.O. Method of obtaining a stable dispersion of a gel of polyvinyl alcohol in the form of a powder (intellectual product). Patent No 2574403. Russian Federation. Field of search: F 25 C 5 02, B 02 C 19 00. Assignee: Earth Cryosphere Institute SB RAS. Appl. No 201414307/04. Filled 20.10.2014. Published 10.02.2016.
6. Lozinsky V.I. Cryotropic gelation of poly(vinyl alcohol) solutions. Uspekhi Khimii. 1998. V. 67. P. 651-655.
7. Podenko L.S., Drachuk A.O., Molokitina N.S., Nesterov A.N. Multiple methane hydrate formation in powder poly(vinyl alcohol) cryogel for natural gas storage and transportation // Journal of Natural Gas Science and Engineering. – 2021. – Vol. 88. – 103811 p.
8. V.P. Mel'nikov, L.S. Podenko A.N. Nesterov, A.O. Drachuk, N.S. Molokitina, A.M. Reshetnikov SelfPreservation of Methane Hydrates Produced in "Dry Water" Doklady Chemistry, 2016, Vol. 466, Part 2, pp. 53–56.

ЯМР-ИССЛЕДОВАНИЕ МАТЕРИАЛОВ, СОДЕРЖАЩИХ ПОЛИВИНИЛОВЫЙ СПИРТ, ПЕРСПЕКТИВНЫХ ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В ГАЗОГИДРАТНЫХ ТЕХНОЛОГИЯХ

Молокитина Н.С.^{1, 2}, Поденко Л. С.¹, Плетнева К. А., Берендеева О. Е., Драчук А. О.¹

¹ Институт криосферы Земли ФИЦ ТюмНЦ СО РАН
Тюмень, Россия

² Казанский (Приволжский) Федеральный Университет
Казань, Россия

³ Тюменский государственный университет
Тюмень, Россия

Аннотация. Изучена возможность использования метода ядерного магнитного резонанса для анализа формирования криогелевых материалов на основе поливинилового спирта, перспективных для применения в газогидратных технологиях. Изучены особенности ядерной магнитной релаксации в этих материалах. Разработана методика ЯМР-анализа формирования криогеля поливинилового спирта, основанная на анализе изменения ЯМР релаксационных параметров в результате криогенной обработки смеси воды и поливинилового спирта.

Abstract. At this work it was studied the possibility of using the NMR method to investigate properties of PVA cryogel systems that are proposed to be a perspective for use in gas hydrate technologies. The features of nuclear magnetic relaxation processes in PVA cryogels have been researched. A NMR technique for analysis of PVA cryogel formation was developed based on the measuring of NMR parameters of PVA samples after carrying out the cryostructuring regime of PVA water solution.

Инновационной альтернативой традиционным способам транспорта и хранения природного газа является использование для этих целей газовых гидратов. Основным препятствием для развития этого направления является низкая скорость и степень

перехода воды в газовый гидрат. Недавно нами было показано, что с помощью порошковых криогелей поливинилового спирта (ПК ПВС) можно получать газовые гидраты с высокой скоростью и степенью перехода воды в гидрат [1]. Установлено, что ПК ПВС более стабильны в повторных циклах гидратообразования/диссоциации, чем “сухая вода” и “сухой гель” – являющиеся перспективными материалами для использования в газогидратных технологиях. ПК ПВС получают из замороженного водного раствора поливинилового спирта (ПВС) путем его измельчения с добавлением гидрофобных наночастиц и последующего оттаивания [2]. В результате такой криогенной обработки формируется криогель – полимерный пористый материал, содержащий воду. Свойства этого материала в определяющей степени задаются особенностями формирования криогеля ПВС. Для анализа образования криогеля ПВС в сплошных средах традиционно используют методы определения реологических свойств материалов. В случае порошковых материалов, к которым относится ПК ПВС, этот способ не применим. Эффективным методом анализа процессов молекулярной перестройки полимеров в водных дисперсных материалах является метод ядерного магнитного резонанса (ЯМР) [3]. Применение этого метода для анализа структурирования полимера в результате образования водополимерных молекулярных (переходящих при разбавлении в раствор) гелей основано на сильной зависимости времени спин-спиновой релаксации (T_2) от степени структурированности полимера. Образование криогеля сопровождается более масштабным и необратимым структурированием основной массы полимера. По этой причине применение метода ЯМР для анализа образования криогелей в дисперсных материалах представляется перспективным. Однако характер влияния криогенной обработки на ЯМР-релаксационные параметры водополимерных материалов, предназначенных для использования в газогидратных технологиях, остается не изученным.

Нами исследовано влияние криогенной обработки на спин-спиновую релаксацию протонов, содержащихся в смеси воды и ПВС. Содержание ПВС в образцах задавали от 1 до 12 мас. %. Использовали ПВС разного молекулярного веса (31000–186000 Да) и разной степени деацетилирования (87-100%). Эти параметры существенно влияют на способность ПВС образовывать криогели. Образцы исходных растворов замораживали, выдерживали сутки при температуре -14°C , оттаивали в программируемом криостате со скоростью 2 град/час. После оттаивания осуществлялось измерение ЯМР релаксационных характеристик, затем цикл замораживания/оттаивания повторялся. Таких циклов было проведено не менее пяти. Измерение ЯМР релаксационных характеристик образцов проходило с использованием импульсного релаксометра Bruker Minispec mq с резонансной частотой 20 МГц.

На рис. 1 показан типичный характер изменения разности скоростей ЯМР-релаксации образцов воды, содержащей ПВС, до и после процедуры замораживания/оттаивания $1/T_{2к} = 1/T_{2и} - 1/T_{2о}$ (где $T_{2и}$ и $T_{2о}$ время спин-спиновой релаксации образца до и после криогенной обработки) в зависимости от концентрации ПВС в растворе. В области концентраций, характерных для растворов ПВС не более 3 мас. %, эта разность близка к нулю. Это согласуется с тем, что свойства водных растворов ПВС и молекулярных гелей восстанавливаются после проведения процедуры замораживания/оттаивания. С увеличением концентрации ПВС от 3 до 8 мас. % растет скорость ЯМР-релаксации в результате необратимого структурирования полимера при образовании криогеля. Этот хорошо согласуется с тем, что образование криогелей носит необратимый характер. В области концентраций, характерных для формирования прочных криогелей ПВС (более 8 мас. %), скорость ЯМР релаксации достигает максимального значения и слабо зависит от концентрации ПВС.

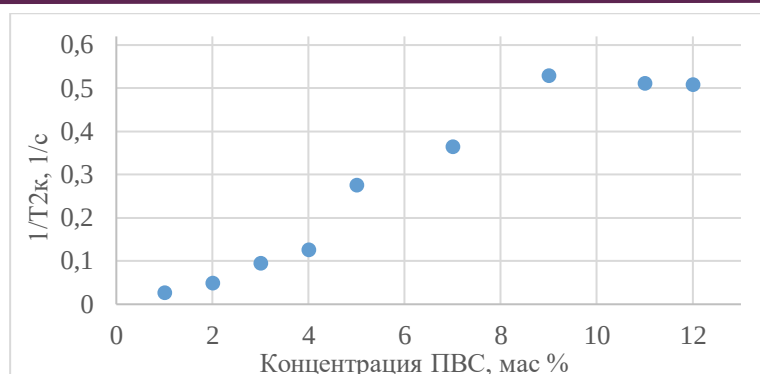


Рис. 1. Изменение $1/T_{2k}$ для образцов водного раствора ПВС (3 мас. %) с увеличением концентрации полимера при проведении одного цикла замораживания/оттаивания

Параметр $1/T_{2k}$ использован нами для оценки способности формировать криогели ПВС разного молекулярного веса, степени деацетилирования и полученного разными производителями.

В результате проведенного исследования показано, что метод ЯМР является эффективным инструментом анализа формирования криогелей ПВС предназначенных для использования в газогидратных технологиях.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФ 20-79-00285 и частичной поддержке гранта РФФИ 20-43-72002.

Литература

1. Podenko L.S., Drachuk A.O., Molokitina N.S., Nesterov A.N. Multiple methane hydrate formation in powder poly(vinyl alcohol) cryogel for natural gas storage and transportation // Journal of Natural Gas Science and Engineering. – 2021. – Vol. 88. – 103811 p.
2. Melnikov V.P., Podenko L.S., Nesterov A.N., Molokitina N.S., Drachuk A.O. Method of obtaining a stable dispersion of a gel of polyvinyl alcohol in the form of a powder (intellectual product). Patent No 2574403. Russian Federation. Field of search: F 25 C 5 02, B 02 C 19 00. Assignee: Earth Cryosphere Institute SB RAS. Appl. No 201414307/04. Filled 20.10.2014. Published 10.02.2016.
3. Манк В. В., Лебовка Н. И. Спектроскопия ядерного магнитного резонанса воды в гетерогенных системах. Киев, Наук. думка, 1988, 204 с.

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЗЛОЖЕНИЯ ГАЗОГИДРАТА В «КУПОЛЕ-СЕПАРАТОРЕ» ИЗ МАТЕРИАЛА «СТАЛЬ – 20»

Насыров А. А.¹, Чиглинцева А. С.¹, Чиглинцев И. А.²

Уфимский государственный нефтяной технический университет
Уфа, Россия

Бирский филиал Башкирского государственного университета
Бирск, Россия

Аннотация. В работе рассмотрена математическая модель установки «купол-сепаратор», изготовленного из материалов сталь-20 и полиуретана, трёх различных толщин: 0,5; 1 и 1,5 см. Установка может быть применена для сбора нефти и газа на больших глубинах в условиях гидратообразования. Проведено сравнение основных теплофизических параметров и описано движение границ раздела углеводородов и разложение слоя гидрата внутри установки.

Abstract. The paper considers a mathematical model of the "dome-separator" installation made of steel-20 and polyurethane materials, of three different thicknesses: 0.5; 1 and 1.5 cm. The unit can be used to collect oil and gas at great depths in conditions of hydrate

formation. The comparison of the main thermophysical parameters is carried out and the motion of the hydrocarbon interfaces and the decomposition of the hydrate layer inside the installation are described.

При добыче углеводородов в водах океана важной задачей является предотвращение их утечки в случае возникновения аварийных ситуаций, которые в своё время происходили в Мексиканском заливе (2010г.) и Северном море (2012г.). Особенно это актуально становится при разработке месторождений в арктической зоне, где живые организмы особенно чувствительным к изменениям в окружающей среде. Одним из решений в данном вопросе может являться применение сепаратора в виде купола, располагаемого над местом утечки [1, 2]. Но данный способ имеет некоторые недостатки, одним из которых является гидрат, который образуется в установке при соответствующих условиях [3,4] и который в последствии может привести к остановке процесса откачки собранного углеводорода.

В данной статье рассматривается цилиндрический «купол-сепаратор» и получают продолжение работы [5] и [6].

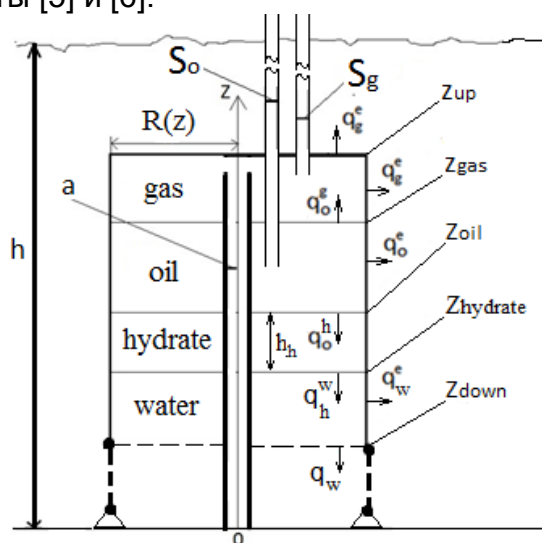


Рис. 1. Принципиальная схема «купола-сепаратора»

Показаны радиусы цилиндрического «купола-сепаратора» $R(z)$ и скважины a , глубина расположения купола h , верхняя Z_{up} и нижняя Z_{down} границы установки, толщина газогидрата h_h , а так же для трубоков, отводящих нефть и газ их площади поперечных сечений S_o , S_g .

Литература

1. Жуков А. В., Звонарев М.И., Жукова Ю.А. Способ добычи газа из глубоководных месторождений газогидратов // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2013. №10, ч.1 – С. 16-20.
2. Гималтдинов И.К., Кильдибаева С.Р. К теории начального этапа накопления нефти в куполе-сепараторе // Теплофизика и аэромеханика. 2015, Т.22, № 3.– С. 401-406.
3. Макагон Ю. Ф. Гидраты природных газов. – М.: Недра, 1974 – 208 с.
4. Истомин В. А., Якушев В.С. Газовые гидраты в природных условиях. – М.: Недра, 1992 – 235 с.
5. Насыров А. А. Моделирование процесса наполнения «купола – сепаратора», предназначенного для ликвидации нефтегазовых выбросов в зоне морского дна // Вестник Кемеровского государственного университета. 2015. №2(62). Том 1. – С. 41-45.
6. Чиглинцев И. А., Насыров А. А. Моделирование процесса наполнения «купола-сепаратора», с разложением газогидрата, образовавшегося в период монтажа установки // Инженерно-физический журнал. 2016. №4. Т. 89. С. 851-860.

ИНТЕНСИФИКАЦИЯ РОСТА ГИДРАТОВ CO₂ В НЕПЕРЕМЕШИВАЕМОМ РЕАКТОРЕ

Нестеров А. Н., Решетников А. М.

Институт криосферы Земли Тюменского научного центра СО РАН
г. Тюмень, Россия

Аннотация. Обобщены результаты ранее выполненных исследований влияния смешанной добавки фреона R-134a и додецилсульфата натрия (SDS) на гидратообразование CO₂. Эксперименты проводились с газовой смесью 94 мол.% CO₂ + 6 мол.% R-134a для чистой воды и 0,1 мас.% раствора SDS в реакторе без перемешивания. Визуальные наблюдения за образованием гидрата для газовой смеси CO₂+R-134a показали, что без SDS образование гидрата ограничивалось латеральным ростом гидратной пленки на границе раздела газ-жидкость. В присутствии SDS наблюдали капиллярный рост гидрата на стенках реактора с конверсией воды в гидрат более 90%.

Abstract. The results of earlier studies of the effect of a mixed addition of R-134a freon and sodium dodecyl sulfate (SDS) on the formation of CO₂ hydrates are generalized. The experiments were carried out with a gas mixture of 94 mol% CO₂ + 6 mol% R-134a for pure water and 0.1 wt% SDS solution in an unstirred reactor. Visual observation of the hydrate formation for the CO₂+R-134a gas mixture revealed that, without SDS, the hydrate formation was limited by the lateral growth of the hydrate film at the gas-liquid interface. In the presence of SDS, the capillary-driven hydrate growth on the reactor walls was observed with the water conversion into hydrate of more than 90%.

Введение

Технологии на основе газовых гидратов рассматриваются как многообещающий новый подход к улавливанию диоксида углерода из топливных и дымовых газовых смесей, захоронение CO₂, опреснение морской воды. Однако практическое применение этих технологий ограничено из-за медленной кинетики образования гидрата CO₂ и низкого конверсии воды в гидрат, особенно без перемешивания.

Хорошо известен промотирующий эффект поверхностно-активных веществ (ПАВ) на образование гидратов углеводородных газов в статических условиях (без перемешивания) [1]. В то же время во многих исследованиях сообщалось об отсутствии влияния ПАВ на образование гидрата CO₂ в статических условиях [2,3]. Ранее в [4] мы показали, что влияние ПАВ на механизм и кинетику роста гидрата CO₂ зависит от движущей силы образования гидрата (например, переохлаждения ΔT или пересыщения Δp). При малых ΔT в присутствии ПАВ (додецилсульфат натрия (SDS)) наблюдался капиллярный рост гидрата CO₂ в статических условиях с конверсией воды в гидрат более 90%. Однако скорость роста гидратов была недостаточно высокой, т.к. при малых ΔT ограничивалась теплопередачей. В литературе описано влияние термодинамических ускорителей гидратообразования в присутствии ПАВ, таких как, например, тетрагидрофуран [3] и циклопентан [2]. Эти добавки снижают равновесное давление гидратообразования относительно чистого CO₂.

Экспериментальная часть

В качестве термодинамического промотора мы использовали 1,1,1,2-Тетрафторэтан (CH₂FCF₃, R-134a), который образует гидрат sII со стехиометрическим составом R-134a · 17H₂O. В [5] показано, что добавка 2–8 мол.% R-134a к CO₂ снижает равновесное давление смешанного гидрата CO₂ + R-134a в 3–5 раз по сравнению с простым гидратом CO₂.

Для получения гидратов использовали чистый газ CO₂, газовую смесь 94 мол.% CO₂ + 6 мол.% R-134a, а также дистиллированную воду или раствор SDS 0,1 мас.%, подробнее в [6].

В экспериментах при образовании смешанного гидрата $\text{CO}_2 + \text{R-134a}$ из чистой воды фиксировали экзотермический пик и затем незначительное понижение давления. Присутствие R-134a уменьшило индукционный период по сравнению с чистым CO_2 , но не повлияло на конверсию воды в гидрат.

В экспериментах при образовании гидратов из газовой смеси в присутствии SDS наблюдались два экзотермических пика, каждый из которых сопровождался заметным падением давления в реакторе. Мы предполагаем, что первый из пиков соответствует зародышеобразованию смешанного гидрата $\text{CO}_2 + \text{R-134a}$, а второй пик соответствует зарождению простого гидрата CO_2 . Именно присутствие смешанного гидрата $\text{CO}_2 + \text{R-134a}$ способствовало зародышеобразованию простого гидрата CO_2 , т.к. образование гидратов из чистого CO_2 ни из чистой воды, ни из раствора SDS за сравнимое время мы не зафиксировали. При гидратообразовании из газовой смеси $\text{CO}_2 + \text{R-134a}$ в наших экспериментах примерно 8% раствора SDS переходило в гидрат. Затем в процессе роста простого гидрата CO_2 дополнительный газ подавали из баллона с чистым CO_2 и в изобарных условиях удавалось достичь перехода еще около 85% раствора SDS в гидрат.

Эксперименты с визуальным наблюдением за ростом гидратов показали, что гидратообразование из газовой смеси $\text{CO}_2 + \text{R-134a}$ в чистой воде идет в виде латерального роста корки вдоль границы жидкость-газ со стороны газовой фазы. Такой рост характерен для роста гидратов малорастворимых газов, но при этом скорость роста была довольно низкой и при переохлаждении ΔT 4,6 К составляла 60 мкм/с, что намного меньше, чем для гидратов метана (180 мкм/с) или гидратов из чистого CO_2 (2,4–8,0 мм/с [4]) при той же ΔT .

Совсем иная картина наблюдалась при гидратообразовании газовой смеси $\text{CO}_2 + \text{R-134a}$ из раствора SDS. Смешанный гидрат в присутствии SDS рос по капиллярному механизму в виде пористых отложений гидрата на стенках и окне реактора вверх от границы раздела газ-жидкость, а раствор SDS мигрировал из объема в поры гидратных отложений под действием капиллярных сил.

Заключение

1. в качестве термодинамического промотора добавка R-134a снижает давление и уменьшает индукционный период образования смешанного гидрата $\text{CO}_2 + \text{R-134a}$ по сравнению с таковыми для простого гидрата CO_2 ;
2. добавление SDS не влияет на индукционный период смешанного гидрата $\text{CO}_2 + \text{R-134a}$; способствует росту гидратов по капиллярному механизму увеличивая скорость роста и превращение воды в гидрат для газовой смеси $\text{CO}_2 + \text{R-134a}$;
3. простой гидрат CO_2 растет на стенках реактора после образования там смешанного гидрата $\text{CO}_2 + \text{R-134a}$ в присутствии SDS до тех пор, пока вся вода не перейдет в гидрат.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ и Тюменской области в рамках научного проекта № 20-43-720002, программы фундаментальных исследований РАН № IX. 135.2.

Литература

1. Kumar A., Bhattacharjee G., Kulkarni B.D., Kumar R., Role of surfactants in promoting gas hydrate formation // Ind. Eng. Chem. Res. – 2015. – Vol. 54. – Pp. 12217–12232.
2. Zhang J., Lee J.W. Enhanced kinetics of CO_2 hydrate formation under static conditions // Ind. Eng. Chem. Res. – 2009. – Vol. 48. – Pp. 5934–5942.
3. Torré J.P., Ricaurte M., Dicharry C., Broseta D. CO_2 enclathration in the presence of water-soluble hydrate promoters: hydrate phase equilibria and kinetic studies in quiescent conditions // Chem. Eng. Sci. – 2012 – Vol. 82. – Pp. 1–13.

4. Molokitina N.S., Nesterov A.N., Podenko L.S., Reshetnikov A.M. Carbon dioxide hydrate formation with SDS: Further insights into mechanism of gas hydrate growth in the presence of surfactant // *Fuel*. – 2019. – Vol. 235. – Pp. 1400–1411.
5. Lee H., Park C., Lee E., Lee J.D., Kim Y. Effect of HFC-134a as a promoter of CO₂ hydrate: phase equilibrium, dissociation enthalpy and kinetics // *J. Chem. Eng. Data*. – 2017. – Vol. 62. – Pp. 4395–4400.
6. Nesterov A.N., Reshetnikov A.M. New combination of thermodynamic and kinetic promoters to enhance carbon dioxide hydrate formation under static conditions // *Chem. Eng. J.* – 2019. – Vol. 378. – Pp.122165.

ДИМЕТИЛСУЛЬФОКСИД КАК ИНГИБИТОР ГИДРАТООБРАЗОВАНИЯ МЕТАНА И ДИОКСИДА УГЛЕРОДА: ФАЗОВЫЕ РАВНОВЕСИЯ, ТЕМПЕРАТУРА ЗАМЕРЗАНИЯ, ПЛОТНОСТЬ И ВЯЗКОСТЬ ВОДНЫХ РАСТВОРОВ

Семенов А. П.¹, Мендгазиев Р. И.¹, Стопорев А. С.^{1, 2, 3}, Истомин В. А.^{1, 4},
Сергеева Д. В.^{1, 4}, Винокуров В. А.¹

¹ Российский государственный университет нефти и газа
(национальный исследовательский университет) имени И. М. Губкина
Москва, Россия

² Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, Россия

³ Институт неорганической химии им. А. В. Николаева СО РАН
Новосибирск, Россия

⁴ Сколковский институт науки и технологий
Москва, Россия

Аннотация. Одной из актуальных задач нефтегазовой отрасли является поиск новых более эффективных ингибиторов гидратообразования. Диметилсульфоксид (ДМСО) может рассматриваться как один из перспективных антигидратных реагентов. ДМСО и его водные растворы исследованы комплексом физико-химических методов. Измерены условия фазовых равновесий гидратов CH₄ и CO₂ в широком диапазоне концентраций ДМСО и давления газа, а также идентифицирован тип структуры гидратов. Водные растворы ДМСО подробно охарактеризованы путем измерения температур замерзания, плотности и вязкости.

Abstract. Search for new, more effective hydrate formation inhibitors is one of the oil and gas industry's urgent tasks. Dimethyl sulfoxide (DMSO) can be considered as a promising anti-hydrate reagent. DMSO and its aqueous solutions were investigated by several physicochemical methods. Phase equilibria of CH₄ and CO₂ hydrates were measured in a wide range of DMSO concentrations and gas pressure. The type of hydrate structure was identified. DMSO aqueous solutions were characterized in detail by measuring freezing points, density, and viscosity.

Образование техногенных газовых гидратов является типичным осложнением, возникающим при добыче и транспортировке природного газа и нефти. Применение термодинамических ингибиторов (ТИГ) является на сегодняшний день самым надежным способом предотвращения гидратообразования. При сравнительно высоких дозировках (до 60 %мас.) ТИГ уменьшают термодинамическую активность воды в растворе, что позволяет сместить равновесные условия формирования гидратов в область более низких температур и высоких давлений и, таким образом, вывести потенциально опасный участок трубопровода из зоны стабильности гидратов. К такого рода ингибиторам относятся неионные полярные органические соединения, в основном одно- и многоатомные низкомолекулярные спирты. Несмотря на основной недостаток, связанный с высокими дозировками, применение ТИГ является технологически проверенным способом предотвращения образования гидратов и льда в системах добычи и промышленной обработки углеводородного сырья. Предметом наших исследований является диметилсульфоксид (ДМСО) – биполярный апротонный растворитель

широкого спектра веществ различной природы (вода, углеводороды, полярные органические вещества, соли). В этой связи ДМСО находит применение в химии, химической технологии, биологии, медицине и технике. В водных растворах ДМСО проявляет антифризные свойства, что является предпосылкой для наличия у него свойств ингибитора гидратообразования [1].

Литературный обзор показал, что работы, посвященные изучению гидратообразования в присутствии ДМСО немногочисленны [2–6]. В большинстве работ ДМСО при низкой концентрации ($x \leq 0.0165$) играл роль добавки, повышающей растворимость диоксида углерода в водном растворе, что улучшало эффективность гидратного разделения CO_2 -содержащих газовых смесей. Единственной работой, посвященной систематическому изучению влияния ДМСО (0–30 %мас.) на фазовое равновесие газовых гидратов (на примере ксенона), является недавняя статья [6].

Для оценки антигидратной активности измерены равновесные условия разложения газовых гидратов в системах водный раствор ДМСО – газообразный метан и водный раствор ДМСО – газообразный диоксид углерода. Измерения проведены изохорным методом в термостатируемом автоклаве с верхнеприводной мешалкой для широкого диапазона концентраций ДМСО (0–55 %мас.), температур (242–289 К) и давлений (1–13 МПа). Полученные данные показывают, что ДМСО является термодинамическим ингибитором гидратообразования метана и диоксида углерода. Результаты порошковой рентгеновской диффрактометрии указывают на то, что ДМСО не образует двойной гидрат с метаном во всем диапазоне концентраций. Предложена корреляция, которая с высокой точностью описывает зависимость термодинамического понижения равновесной температуры гидратообразования ΔT_h (для CH_4 и CO_2) от массовой доли ДМСО в растворе и давления газа. Было обнаружено, что при концентрациях выше 33 и 53 мас.% ДМСО становится более эффективным ТИГ, чем широко используемые моноэтиленгликоль и метанол соответственно. Такое поведение связано с большей неидеальностью водных растворов ДМСО (отрицательные отклонения от закона Рауля) по сравнению с водными растворами спиртов. Получены экспериментальные данные по температурам замерзания водных растворов ДМСО, на основании которых установлена линейная взаимосвязь между понижением равновесной температуры гидратообразования ΔT_h (для CH_4 и CO_2) и понижением равновесной температуры замерзания ΔT_{ice} водных растворов ДМСО.

Проведен сравнительный анализ плотности и кинематической вязкости водных растворов ДМСО и метанола на основании результатов исследования образцов методами капиллярной вискозиметрии и денсиметрии при атмосферном давлении в диапазоне температур 273–293 К и концентраций (0–100 %мас.). Полученные результаты указывают на перспективность ДМСО (в виде концентрированных водных растворов) как ингибитора гидратообразования, сочетающего высокую антигидратную активность, низкую летучесть (по сравнению с метанолом), приемлемые вязкостные свойства водных растворов. Представляет значительный интерес дальнейшее изучение ингибиторов термодинамического и кинетического действия на основе ДМСО с целью поиска более эффективных антигидратных реагентов.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 20-79-10377).

Литература

1. RASMUSSEN D.H., MACKENZIE A.P. Phase Diagram for the System Water–Dimethylsulphoxide // Nature. – 1968. – Vol. 220, № 5174. – P. 1315–1317.
2. Xia Z.-M. et al. Thermodynamic Equilibrium Conditions for Simulated Landfill Gas Hydrate Formation in Aqueous Solutions of Additives // J. Chem. Eng. Data. – 2012. – Vol. 57, № 11. – P. 3290–3295.
3. Xia Z.-M. et al. Hydrate-based CO_2 capture and CH_4 purification from simulated biogas with synergic additives based on gas solvent // Appl. Energy. – 2016. – Vol. 162. – P. 1153–1159.

4. Xia Z. et al. Hydrate-based hydrogen purification from simulated syngas with synergic additives // Int. J. Hydrogen Energy. – 2016. – Vol. 41, № 4. – P. 2649–2659.
5. Castillo-Borja F. et al. Biogas purification via slI hydrates in the presence of THF and DMSO solutions using MD simulations // J. Mol. Liq. – 2020. – Vol. 297. – P. 111904.
6. Maekawa T. Equilibrium conditions of xenon hydrates in the presence of water-soluble additives of dimethyl sulfoxide, amides and amines // Fluid Phase Equilib. – 2019. – Vol. 488. – P. 99–103.

ИНГИБИТОРЫ РОСТА ГАЗОВЫХ ГИДРАТОВ НА ОСНОВЕ СУЛЬФИРОВАННОГО ХИТОЗАНА

Семенов М. Е.^{1, 2}, Павельев Р. С.¹, Фархадян А.¹, Варфоломеев М. А.¹

¹ Казанский (Приволжский) федеральный университет
Казань, Россия

² Институт проблем нефти и газа СО РАН
Якутск, Россия

Аннотация. Снижение количества используемых в области нефтехимии реагентов, а также переход на биоразлагаемые и малотоксичные соединения является весьма актуальной задачей. В данной работе предложен метод модификации хитозана, позволяющий получать эффективные в ингибировании роста гидрата метана реагенты. Предлагаемые ингибиторы позволят снизить вредное воздействие на окружающую среду, риски аварий и эксплуатационные расходы.

Abstract. Reducing the amount of petrochemical reagents, as well as the transition to biodegradable and low-toxic compounds is an urgent task. In this work, we propose a method for modifying chitosan, which allows one to obtain reagents effective in methane hydrate growth inhibition. The proposed inhibitors can reduce the harmful impact on the environment, the risks of accidents and operating costs.

В природном газе, газовом конденсате и нефти присутствуют углеводороды алканового ряда C_1 - C_4 , углекислый газ, сероводород, азот, которые при внедрении в полости кристаллической решетки, формируемой молекулами воды посредством водородных связей при определенных температурах и давлениях могут образовывать соединения включения – газовые гидраты. В процессе добычи и транспортировки углеводородов создаются подходящие термобарические условия для образования газовых гидратов, например в стволе скважин, трубопроводах и нефтепромысловом оборудовании. При агломерации гидратных частиц могут образоваться пробки, препятствующие свободному потоку флюидов, что приводит к различного рода техногенным авариям.

Среди доступных методов предотвращения закупорки трубопроводов, таких как снижение давления, повышение температуры и дегидратация, химическая обработка ингибиторами является наиболее экономически эффективным методом [1]. Для предотвращения гидратных пробок в большом количестве используются такие термодинамические ингибиторы гидратообразования (ТИГ), как метанол или различные гликоли, которые при этом являются токсичными веществами. Следует отметить, что снижение количества используемых в области нефтехимии реагентов, а также переход на биоразлагаемые и малотоксичные соединения является весьма актуальной задачей.

В настоящее время широко изучаются и разрабатываются кинетические ингибиторы гидратообразования (КИГ), которые уже сейчас частично заменяют ТИГ в нефтегазовой отрасли [2]. Коммерческие КИГ обычно представляют собой водорастворимые полимеры, такие как гомо- или сополимеры N-винилпирролидона и N-винилкапролактама, активные группы которых затрудняют зародышеобразование и рост кристаллов гидратов [3]. В качестве ингибиторов гидратообразования могут выступать

ионные жидкости [3], но несмотря на отличную способность ингибирования, практически не используются в промышленности из-за их высокой стоимости получения. К тому же, большинство ионных жидкостей относятся к токсичным веществам и одновременно обладают низкой биоразлагаемостью [4]. Важно отметить тот факт, что в целом для КИГ присуща проблема низкой биodeградации в следствие их структурных особенностей, что делает данный класс ингибиторов гидратообразования экологически неприемлемым.

Для решения этой проблемы в последнее время в качестве ингибиторов изучаются аминокислоты и биополимеры (в том числе модифицированные). Аминокислоты глицин, аланин, валин, лейцин, изолейцин, тирозин, серин, аргинин и лизин были изучены с точки зрения ингибиторов гидратов метана и углекислого газа [3]. Однако они недостаточно эффективны, а также способствуют росту микроорганизмов, поскольку являются для них питательным субстратом.

Из биополимеров в качестве ингибиторов выявлен достаточно узкий ряд соединений, а именно хитозан, пектин, крахмал (нативные биополимеры) [3]. В целом, нативные биополимеры обладают достаточно низкой способностью ингибировать образование газогидратов, а также часто мало растворимы в воде. Тем не менее выявлено, что включение сульфонатных групп в основную цепь хитозана улучшает его растворимость в воде [5]. Однако исследований по способности данного биополимера ингибировать образование гидратов не проводилось. Помимо этого, следует отметить, что в рассматриваемой работе использовали хитозан с молекулярной массой в узком диапазоне около 50 кДа.

В связи с этим в данной работе проведена модификация коммерчески доступных деацелированных хитозанов различной молекулярной массы путем сульфирования 1,3-пропансульфоном и ацилирования пропионовым ангидридом, с целью получения соединений способных ингибировать гидратообразование и безопасных для окружающей среды. Для тестирования в условиях гидратообразования были синтезированы производные хитозанов с различной молекулярной массой (6 кДа, 12 кДа, 25 кДа, 45 кДа, 90-150 кДа). Исследование образования и разложения гидратов метана в присутствии данных соединений проводили с использованием дифференциального сканирующего калориметра высокого давления SETARAM 7 Evo. Методика эксперимента была обоснована в работе [6].

Установлено, что исходный немодифицированный хитозан может проявлять промотирующие свойства по сравнению с чистой водой. По предварительным данным, на примере модификации хитозана с молекулярной массой 45 кДа было показано усиление ингибирующих свойств в ряду – исходный деацелированный хитозан (степень деацелирования 98%, промотирует гидратообразование) < сульфированный хитозан < сульфированный и ацилированный хитозан < ацилированный на 50% и сульфированный на 50% хитозан.

Исследование выполнено в рамках проекта № 0671-2020-0048 государственного задания № 075-00216-20-05 от 04.06.2020.

Литература

1. Farhadian, A., Kudbanov, A., Varfolomeev, M. A., Dalmazzone, D. Waterborne polyurethanes as a new and promising class of kinetic inhibitors for methane hydrate formation // Scientific Reports. – 2019. – 9. – P. 9797;
2. Kelland, M.A. History of the development of low dosage hydrate inhibitors // Energy Fuels. – 2006. – 20(3). – Pp. 825–847;
3. Qasima, A., Khana, M.S., Lala, B., Shariffa A.M. A perspective on dual purpose gas hydrate and corrosion inhibitors for flow assurance // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2019. – 183. P. 106418;
4. Garcia, M.T., Gathergood, N., Scammells P.J. Biodegradable ionic liquids Part II. Effect of the anion and toxicology // Green Chemistry. – 2005. – V.-7. Pp. 9–14;

5. Rwei, S.-P., Lien, C.-C. Synthesis and viscoelastic characterization of sulfonated chitosan solutions // Colloid and Polymer Science. – 2014. – 292. Pp. 785–795;
6. Dalmazzone, C., Herzhaft, B., Rousseau, L., Le Parlouer, P., & Dalmazzone, D. Prediction of gas hydrates formation with DSC technique // Society of Petroleum Engineers. – 2003. – Pp. 1-8.

ДИНАМИКА ЗВУКОВЫХ ВОЛН ПРИ НАКЛОННОМ ПАДЕНИИ НА ГРАНИЦУ РАЗДЕЛА МЕЖДУ ПОРИСТОЙ СРЕДОЙ, НАСЫЩЕННОЙ ПУЗЫРЬКОВОЙ ЖИДКОСТЬЮ И ВОДОЙ

Ситдикова Л. Ф., Гималтдинов Л. К.

Уфимский государственный нефтяной технический университет
Уфа, Россия

Аннотация. Изучаются особенности отражения и прохождения волн давления при прохождении через границу раздела со стороны пористой среды, насыщенной пузырьковой жидкостью в случае наклонного падения волн. На основе анализа полученных аналитических решений установлено, что когда «медленная» волна падает на границу раздела «пористая среда, насыщенная пузырьковой жидкостью» при углах, превышающих некоторое критическое значение, зависящее от частоты звука, реализуется условие полного отражения.

Annotation. The features of reflection and transmission of pressure waves when passing through the interface from the side of a porous medium saturated with a bubbly liquid in the case of oblique incidence of waves are studied. Based on the analysis of the obtained analytical solutions, it was found that when the "slow" wave falls on the interface between the "porous medium saturated with a bubbly liquid" at angles exceeding a certain critical value depending on the sound frequency, the condition of total reflection is realized.

Исследование результатов прохождения звуковой волны различной интенсивности через пористые перегородки, а также их воздействие на преграды, покрытые пористым слоем, представляет значительный научный и практический интерес в связи с изучением вопросов акустического каротажа и зондирования. А также это обусловлено весьма актуальной проблемой подавления акустических, ударных и детонационных волн в пористых средах. В пластовых жидкостях во многих случаях присутствует газ.

Для исследования отражения и прохождения звуковой волны через границу «пористая среда, насыщенная пузырьковой жидкостью – вода» при наклонном падении используется модель [1]. Записаны граничные условия: условие неразрывности давления на границе раздела, условие неразрывности усредненной по объему скорости на поверхности раздела, равенство сил, действующих на единицу площади поверхности по обе стороны от этой поверхности.

На рис. 1 представлены зависимость фазовой скорости C_p «быстрой» и «медленной» волн от частоты ω для случая, когда пористая среда заполнена газожидкостной смесью. На рис. 1 наблюдаются три характерных диапазона частот, где существенно различаются не только количественная, но и качественная картина дисперсионных кривых. Из анализа дисперсионного уравнения следует, что эффект дисперсии звука в низкочастотной области $\omega \leq \omega_R$ (ω_R – частота собственных колебаний пузырьков, частота Миннаерта [2]) определяется межфазной температурной неравномерностью. В диапазоне частот $\omega_R < \omega < \omega_C$ ($\omega_C = \omega_R \sqrt{1 + \alpha_{I0} \rho_{I0}^0 C_I^2 / \gamma p_0}$) фазовая скорость принимает аномально высокое значение, поэтому эта зона частот соответствует зоне непропускания. Характер кривых для «быстрой» волны соответствуют ха-

рактору кривых, полученным для пористой среды насыщенной «чистой» (безпузырьковой) жидкостью, а фазовая скорость «медленной» волны соответствуют аналогичным параметрам «свободной» пузырьковой жидкости, полученными в работе.

Зависимости реальной и мнимой части угла преломления для «медленной» волны от угла падения представлены на рис.2 для различных частот. Наличие мнимой части угла преломления связано с тем, что падающая волна в пористой среде является затухающей. При этом действительная часть угла имеет обычный геометрический смысл. Видно, что при угле падения $\theta_{2l}^{(0)} \geq 4^\circ$ при $\omega = 10^3 \text{ с}^{-1}$ угол преломления $\theta_{2l}^{(t)} \geq 90^\circ$. При этом для косинуса угла преломления превалирует его мнимая часть.

Для этих углов преломления ($\theta_{2l}^{(t)} \geq 90^\circ$) в воздухе волна хотя и остается затухающей бегущей волной, но для нее характерное расстояние затухания амплитуды волны будет значительно ниже, чем длина волны. То есть будет справедливо монотонное экспоненциальное снижение амплитуды волны в направлении, перпендикулярном к поверхности раздела. И тем самым фактически будет реализовано полное внутреннее отражение.

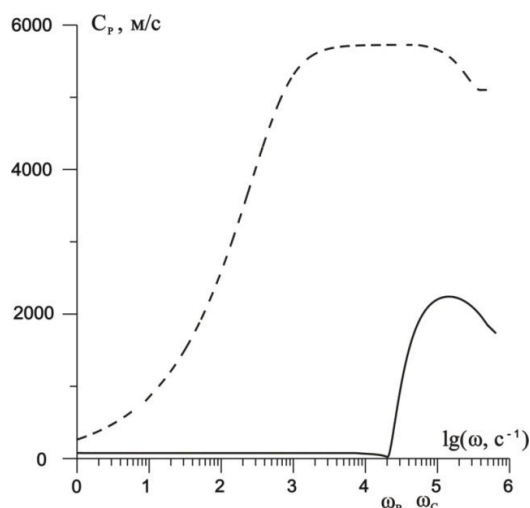


Рис. 1. Зависимость фазовой скорости C_p «быстрой» (пунктирные линии) и «медленной» (сплошные линии) волн от частоты ω для системы песчаник – пузырьковая жидкость. Характерные параметры системы $a_0 = 10^{-4} \text{ м}$, $b_0 = 10^{-3} \text{ м}$, $\alpha_{g0} = 0,01$, $\alpha_{10} = 0,39$, $\alpha_{s0} = 0,6$.

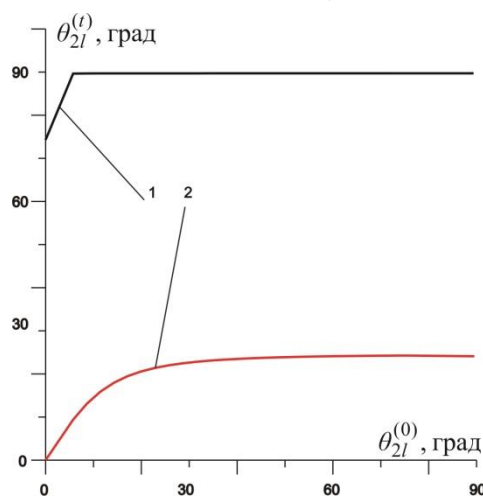


Рис. 2. Влияние угла падения на действительную часть угла преломления для «медленной» волны для границы раздела «пористая среда, насыщенная пузырьковой жидкостью – вода». Линия 1 соответствует $\omega = 103 \text{ с}^{-1}$, линия 2 – $\omega = 105 \text{ с}^{-1}$

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-31-60015.

Литература

1. Ситдикова Л. Ф., Гималтдинов И.К. Задача о распространении акустических волн в пористой среде, насыщенной пузырьковой жидкостью // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Математика. Механика. Физика». – 2021. – Т.13, №1. – С. 59–66.
2. Нигматулин Р. И. Динамика многофазных сред. М.: Наука, 1987 – 464с.

МНОГОСТАДИЙНОСТЬ ПРОЦЕССА ОБРАЗОВАНИЯ ГАЗОВЫХ И ИОННЫХ КЛАТРАТНЫХ ГИДРАТОВ: РАЗНОВИДНОСТИ И ПРИЧИНЫ ПРОЯВЛЕНИЯ

Стопорев А.^{1, 2, 3}, Семенов М. Е.^{1, 4}, Зарипова Ю. Ф.¹, Семенов А. П.,
Варфоломеев М. А.¹, Манаков А. Ю.²

¹ Казанский (Приволжский) федеральный университет
Казань, Россия

² Институт неорганической химии им. А. В. Николаева СО РАН
Новосибирск, Россия

³ Российский государственный университет нефти и газа
(национальный исследовательский университет) имени И. М. Губкина,
Москва, Россия

⁴ Институт проблем нефти и газа СО РАН
Якутск, Россия

Аннотация. Несмотря на то, что зарождению новой фазы уделяется большое внимание при изучении кинетики образования клатратных гидратов и способов их ингибирования, стадийность данного процесса остаётся практически неизученной. Накопление и систематизация знаний о механизме нуклеации и последующего роста клатратных гидратов позволит найти решения для замедления или, наоборот, ускорения их формирования, что актуально для разработки технологий хранения и транспортировки энергии в гидратной форме.

Abstract. Although nucleation of a new phase is paid a lot of attention when studying the kinetics of the formation of clathrate hydrates and ways of their inhibition, there is almost no data on the staging of this process. The accumulation and systematization of knowledge on the mechanism of nucleation and subsequent growth of clathrate hydrates will allow us to find solutions to hydrate inhibition or, conversely, its acceleration, which is urgent for developing technologies for storing and transporting energy in hydrate form.

Многостадийный процесс зародышеобразования может быть связан с разными причинами, например, с протеканием событий первичной нуклеации на различных поверхностях. В эмульсиях вода/нефть может наблюдаться скрытая кристаллизация, что соответствует отдельным событиям зародышеобразования в разных каплях без заметных тепловых эффектов. Если же в образце возможно протекание вторичной нуклеации, на термической кривой могут наблюдаться множественные экзотермические эффекты. Более того, природа наблюдаемого явления будет совершенно иной – кристаллизация на вновь образованных центрах зародышеобразования, где сами кристаллы выступают в роли затравок. Помимо вышеизложенного, возможным объяснением многостадийности процесса нуклеации может быть возникновение фазовых превращений в зародыше (например, образование метастабильных фаз [1–5]). Следует отметить, что в настоящее время практически отсутствуют устоявшиеся представления об этапах формирования кристаллической фазы в потоках вода – нефть – газ.

Между тем эта информация крайне важна для понимания процессов ингибирования газовых гидратов.

В данной работе проведено детальное исследование процессов нуклеации и роста газовых гидратов в системах вода – гидратообразователь и вода – углеводород – гидратообразователь. Комплекс исследований выполнен методом дифференциальной сканирующей калориметрии (SETARAM μ DSC7 EVO, Франция) с контролем фазового состава методом порошковой рентгеновской дифрактометрии (дифрактометр Bruker D8 Advance, оснащенный низкотемпературной приставкой TTK 450, Anton Paar). Образцы для рентгена закачивали на разных стадиях кристаллизации. В качестве углеводородов использовались как модельные вещества, так и нефти. Также изучалось образование гидратов в присутствии кинетических ингибиторов (PVCap). Задача, решаемая в данном исследовании, заключается в выявлении механизма образования гидратной фазы при температурах ниже 0 °C, что имеет решающее значение для как для грамотного предотвращения аварийных ситуаций, вызванных гидратами, так и для ускорения нуклеации и роста газовых и ионных клатратных гидратов. Было показано, что возможность протекания вторичной нуклеации льда и гидрата метана через эстафетный механизм сильно зависит от состава используемой нефти, а также от температуры и давления. Анализ статистики индукционных периодов нуклеации гидрата метана в эмульсиях вода/нефть указывает на нестационарный характер гетерогенного зародышеобразования, а также на значительное влияние состава нефти, поверхностно-активных веществ и типа материала реактора на данный процесс. Эти особенности могут указывать на фазовые переходы, происходящие в растущих частицах гидратов. Также было изучено влияние газовой фазы на механизм эстафетной кристаллизации льда в водонефтяных эмульсиях. Отсутствие давления газа в таких системах затрудняет вторичную нуклеацию льда, и образование кристаллической фазы происходит независимо в каждой капле.

Любопытной особенностью нуклеации гидратов является образование метастабильных фаз, например, гидрата метана кубической структуры II и ионного клатратного гидрата бромид тетра-н-бутиламмония кубической структуры I. Образование данных фаз наблюдалось при высоких скоростях охлаждения с последующим замораживанием образца до температуры кипения жидкого азота, что обеспечивает возможную закалку продуктов начальной стадии кристаллизации. Таким образом, накопленные к настоящему времени экспериментальные и литературные данные свидетельствуют о том, что процесс нуклеации гидратов является многостадийным. Несомненно, наблюдается образование метастабильных фаз различных гидратов. Добавка различных реагентов (ингибиторы/промоторы) непременно должна влиять на этот процесс. Например, добавление поверхностно-активного вещества Span 80 к эмульсии вода/нефть, по-видимому, нарушает сорбционное равновесие на границе нефть–вода, что приводит к смене маршрута нуклеации в присутствии поверхностно-активного вещества. Данные о влиянии скорости охлаждения и типа дисперсионной среды на фазовый состав образующегося гидрата позволят установить механизм/стадийность процесса кристаллизации гидрата (аморфная фаза – метастабильный гидрат – стабильный гидрат). Понимание механизма образования газовых гидратов важно для разработки научно-обоснованного подхода к их ингибированию и промотированию.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-35-60013.

Литература

1. Schicks J.M., Luzi-Helbing M. Cage occupancy and structural changes during hydrate formation from initial stages to resulting hydrate phase // Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy. – 2013. – V. 115. – P. 528-536.

2. Schicks J.M., Luzi-Helbing M. Kinetic and thermodynamic aspects of clathrate hydrate nucleation and growth // *Journal of Chemical & Engineering Data*. – 2015. – V. 60(2). – P. 269-277.
3. Ovalle S., Martinez C., Bonilla L., Lara A., Beltran J.G. Assessment of commercial hydrate inhibitors using the 3-in-1 method // *Canadian Journal of Chemical Engineering*. – 2019. – V. 97(11). – P. 2818-2826.
4. Stoporev A.S., Ogienko A.G., Sizikov A.A., Semenov A.P., Kopitsyn D.S., Vinokurov V.A., Svarovskaya L.I., Altunina L.K., Manakov A.Y. Unexpected formation of sII methane hydrate in some water-in-oil emulsions: Different reasons for the same phenomenon // *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. – 2018. – V. 60. – P. 284-293.
5. Stoporev A.S., Kiiamov A.G., Varfolomeev M.A., Rodionova T.V., Manakov A.Y. Metastable ionic cubic structure I clathrate hydrate formed with tetra-n-butylammonium bromide // *Mendeleev Communications*. – V. 31(1). – P. 17-19.

ЗАКАЧКА УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА В МЕТАНОГИДРАТНЫЙ ПЛАСТ С ОТРИЦАТЕЛЬНОЙ ТЕМПЕРАТУРОЙ

Хасанов М. К.¹, Столповский М. В.²

¹Стерлитамакский филиал Башкирского государственного университета
Стерлитамак, Россия

²Уфимский государственный нефтяной технический университет
Уфа, Россия

Аннотация. В работе представлена математическая модель закачки углекислого газа в пористый метаногидратный пласт с отрицательной температурой. Рассматриваемая в задаче схема задачи построена в предположении формирования трех областей: ближней, дальней и промежуточной. Ближняя область, примыкающая к внешней границе пласта и через которую закачивается углекислый газ, насыщена CO_2 и его гидратом; дальняя область пласта насыщена метаном и его гидратом, а промежуточная, разделяющая ближнюю и дальнюю области, насыщена метаном и льдом. Вычислительными экспериментами показано, что представленная схема с формированием трех областей где промежуточная область насыщена метаном и льдом, справедлива лишь для определенных значений параметров инжектируемого углекислого газа. Установлено, что с увеличением интенсивности фазовых переходов образование гидрата CO_2 происходит из углекислого газа и воды; при этом в пласте могут формироваться три или четыре области. В случае формирования трех областей, промежуточная область вместо льда и метана содержит лишь воду и CH_4 . При образовании в пласте четырех областей помимо трех областей, принятых в постановке задачи, формируется дополнительная, четвертая, область, насыщенная метаном и водой. Для случая малых значений интенсивности инъекции CO_2 возможен режим замещения метана в гидрате углекислым газом. В этом случае в пласте формируются лишь две области, без формирования промежуточной области, насыщенной метаном и льдом.

Abstract. The paper presents a mathematical model of the injection of carbon dioxide into a porous methane hydrate reservoir with a negative temperature. The scheme of the problem considered in the problem is constructed under the assumption of the formation of three areas: near, far and intermediate. The near region adjacent to the outer boundary of the formation and through which carbon dioxide is injected is saturated with CO_2 and its hydrate; the far region of the formation is saturated with methane and its hydrate, and the intermediate region separating the near and far regions is saturated with methane and ice. Computational experiments have shown that the presented scheme with the formation of three regions where the intermediate region is saturated with methane and ice is valid only for certain values of the parameters of the injected carbon dioxide. It is established that with an increase in the intensity of phase transitions, the formation of CO_2 hydrate occurs from carbon dioxide and water; in this case, three or four regions can be formed in the reservoir. In the case of the formation of three regions, the intermediate region contains only water and

CH₄ instead of ice and methane. When four regions are formed in the reservoir, in addition to the three regions accepted in the problem statement, an additional, fourth, region is formed, saturated with methane and water. For the case of small values of the CO₂ injection intensity, the mode of substitution of methane in the hydrate with carbon dioxide is possible. In this case, only two regions are formed in the reservoir, without the formation of an intermediate region saturated with methane and ice.

Гидраты природного газа представляют собой твердые кристаллические соединения, образующиеся из воды и газа (в основном метана) при определенных термобарических условиях. Основным аспектом их изучения является тот факт, что газогидраты являются практически неисчерпаемым источником природного газа. Одним из перспективных с точки зрения энергетических затрат методов добычи природного газа является технология замещения молекул в гидрате CH₄ на молекулы CO₂ при закачки углекислого газа в природные скопления газогидратов [1].

В работе рассматривается полубесконечный пористый пласт с непроницаемой кровлей и подошвой, изначально насыщенный метаном и его гидратом. Пусть через левую границу пласта начинает закачиваться углекислый газ, давление и температура которого соответствует условиям стабильного существования гетерогенной смеси CO₂ и его гидрата. При этом температура инжектируемого углекислого газа выше начальной температуры пласта. Она превышает равновесную температуру разложения газогидрата метана, соответствующую начальному давлению пласта, но не превышает температуру плавления льда. При инъекции газообразной двуокиси углерода в пласт, изначально насыщенный метаном и его гидратом, образуются три области. В первой (ближней) области поры насыщены углекислым газом и его газогидратом, вторая (промежуточная) область насыщена метаном и льдом, а поры третьей (дальней) области насыщены метаном и его газогидратом. Соответственно образуются две подвижные границы фазовых переходов. На первой (ближней) границе фазовых переходов (разделяющей первую и вторую области) происходит образование газогидрата CO₂ из углекислого газа и льда. На второй (дальней) границе фазовых переходов (разделяющей вторую и третью области) происходит разложение газогидрата CH₄ на лед и газ.

Система основных уравнений, описывающая процессы фильтрации и теплопереноса в пористой среде и представляющая собой законы сохранения масс и энергии, закон Дарси и уравнение состояния [2, 3]. Кроме того, представленная система дополняется условиями баланса масс и тепла на подвижных границах фазового перехода, а также начально-граничными условиями.

На основе представленной математической модели установлено, что образование гидрата углекислого газа при его нагнетании в пористый пласт, изначально насыщенный метаном и его газогидратом при отрицательной (по шкале Цельсия) температуре, может происходить в четырех режимах. Первый режим, при котором происходит разложение гидрата метана на газ и лед и образование гидрата CO₂ из льда и углекислого газа, характерен для случая одновременно малых значений давления и температуры инъекции. Второй режим, заключающийся в образовании еще одной дополнительной области, насыщенной водой и метаном и образовании CO₂ из воды и углекислого газа, реализуется при низких значениях давления инъекции и одновременно высоких значениях температуры инжектируемой двуокиси углерода. Режим с разложением гидрата метана на газ и воду, а не на газ и лед, происходит при одновременно высоких значениях давления и температуры инъекции углекислого газа. При инъекции CO₂ с малыми значениями температуры и высокими значениями давления реализуется режим с замещением метана в газогидрате на углекислый газ.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 17-79-20001).

Литература

1. Ohgaki K., Takano K., Sangawa H., Matsubara T., Nakano S. Methane exploitation by carbon dioxide from gas hydrates phase equilibria for CO₂–CH₄ mixed hydrate system. Journal of chemical engineering of Japan. –1996. – Vol. 29, No. 3. – Pp. 478 – 483.
2. Гималтдинов И.К., Столповский М. В., Додова М.И. Численное решение задачи об образовании гидрата двуокиси углерода в пористом пласте, изначально насыщенном гидратом метана // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2017. – Т. 328, № 6. – С. 91–98.
3. Столповский М. В., Хасанов М. К., Кулаков П.А. Исследование процесса закачки диоксида углерода в метаногидратные пласты с учетом реальных свойств газов // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. – 2018. – № 2. – С. 101–112.

СМЕСЕВОЙ СИНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ИНГИБИТОР ГИДРАТООБРАЗОВАНИЯ НА ОСНОВЕ ХЛОРИДА МАГНИЯ И МЕТАНОЛА

Семенов А. П.¹, Мендгазиев Р. И.¹, Стопорев А. С.^{1, 2, 3}, Хлебников В. Н.¹,
Сергеева Д. В.^{1, 4}, Истомин В. А.^{1, 4}

¹ Российский государственный университет нефти и газа
(национальный исследовательский университет) имени И. М. Губкина
Москва, Россия

² Казанский (Приволжский) федеральный университет
Казань, Россия

³ Институт неорганической химии им. А. В. Николаева СО РАН
Новосибирск, Россия

⁴ Сколковский институт науки и технологий
Москва, Россия

Аннотация. Актуальной задачей является поиск более технологичных и экономически эффективных ингибиторов гидратообразования. Данная работа посвящена разработке ингибитора гидратообразования термодинамического действия, обладающего более высокой антигидратной активностью и более экологически безопасного, чем чистый метанол. Систематически исследованы физико-химические свойства композиций на основе хлорида магния и метанола и их ингибирующая способность по отношению к гидрату метана.

Abstract. An urgent task is a search for more technologically advanced and cost-effective inhibitors of gas hydrate formation. This work is devoted to the development of a thermodynamic hydrate inhibitor that has higher anti-hydrate activity and is more environmentally friendly than pure methanol. The physicochemical properties of the compositions based on magnesium chloride and methanol and their inhibition power have been systematically studied.

Газовые гидраты являются частным случаем соединений включения, которые образуются путем внедрения небольших молекул (газы, летучие органические жидкости) в полости кристаллической решетки воды [1]. Компоненты, содержащиеся в природных и попутных газах, нефти и газовом конденсате (низшие алканы, CO₂, H₂S, N₂), могут образовывать гидраты при определенных температуре и давлении. При эксплуатации газовых и газоконденсатных месторождений, особенно в северных регионах России, в скважинах и системах внутрипромыслового сбора газа возможно технологическое осложнение – образование гидратов природных газов [2]. Возникают риски гидратных отложений, вплоть до полного перекрытия сечения промыслового трубопровода. В этой связи предотвращение образования техногенных газовых гидратов является одной из важнейших проблем для нефтегазовой отрасли. Для решения дан-

ной проблемы как правило используют ингибиторы гидратообразования термодинамического действия (метанол, гликоли), которые вводят в поток с целью смещения равновесных условий в область более низких температур и высоких давлений. Метанол является основным ингибитором гидратообразования используемым на практике. Недостатки метанола как ингибитора связаны с его токсичностью и низкой температурой кипения, что приводит к его высокой растворимости в сжатых углеводородных газах, значительной летучести и высоким потерям при использовании. Поэтому актуальным является поиск более технологичных и экономически эффективных ингибиторов гидратообразования на основе солей и спиртово-солевых составов. Хлорид магния является многообещающим ингибитором среди солей из-за высокой растворимости в водно-спиртовых растворах и большей ингибирующей способности по сравнению с другими хлоридами (NaCl , KCl , CaCl_2). Кроме того, хлорид магния широко распространен в природе (бишофит, карналлит) и имеет сравнительно невысокую стоимость.

Данная работа посвящена разработке ингибитора гидратообразования термодинамического действия, обладающего более высокой антигидратной активностью и более экологически безопасного, чем чистый метанол. Для этого проведены систематические исследования антигидратной активности и физико-химических свойств композиций на основе метанола и хлорида магния. Измерения фазовых равновесий гидрата метана проведены с помощью термостатируемого автоклава, снабженного верхнеприводной мешалкой и датчиками давления и температуры. На первом этапе работы была измерена кривая трехфазного равновесия $V\text{-}L_w\text{-}H$ для референсной системы метан-вода. Полученная линия трехфазного равновесия для этой системы совпала с литературными данными [3,4] на уровне 0,1 К в диапазоне давлений 3–13 МПа. Равновесные условия гидратообразования метана определены экспериментально для 8 систем вода-метанол (0–60 %мас.), для 5 систем вода-хлорид магния (0–26 %мас.) и 14 систем вода-метанол-хлорид магния. Всего было измерено 166 равновесных точек в интервале температур 243–289 К. Полученные результаты показывают, что увеличение концентрации метанола и хлорида магния предсказуемо приводит к смещению равновесных кривых для гидрата метана в область более высоких давлений и низких температур. Предложены эмпирические корреляции, с высокой точностью описывающие зависимости понижения равновесной температуры гидратообразования ΔT_h от концентрации ингибиторов и давления в системе. Было показано, что CH_3OH и MgCl_2 обладают близкой ингибирующей способностью только при низкой концентрации в растворе (≤ 5 %мас.). При более высоких концентрациях хлорид магния имеет более высокую антигидратную активность по сравнению с метанолом. Для водных растворов $\text{MgCl}_2 + \text{CH}_3\text{OH}$ был обнаружен значительный синергизм термодинамического ингибирования гидрата метана, который выражается в более сильном смещении равновесных кривых по сравнению с аддитивным вкладом каждого ингибитора. Установлено, что отклонение от аддитивности больше для более концентрированных растворов. Из полученных результатов следует, что использование смешанных ингибиторов позволяет значительно снизить количество используемого метанола при сохранении антигидратной активности на аналогичном уровне. Исследуемые водные растворы были подробно охарактеризованы методами капиллярной вискозиметрии, денсиметрии и измерением температуры замерзания.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 20-79-10377).

Литература

1. Sloan E.D., Koh C.A. Clathrate hydrates of natural gases. Third. CRC Press, 2007.
2. Истомина В. А., Квон В.Г. Предупреждение и ликвидация газовых гидратов в системах добычи газа. Москва: ИРЦ Газпром, 2005. 556 р.

3. Gayet P. et al. Experimental determination of methane hydrate dissociation curve up to 55MPa by using a small amount of surfactant as hydrate promoter // Chem. Eng. Sci. – 2005. – Vol. 60, № 21. – P. 5751–5758.
4. Nakamura T. et al. Stability boundaries of gas hydrates helped by methane—structure-H hydrates of methylcyclohexane and cis -1,2-dimethylcyclohexane // Chem. Eng. Sci. – 2003. – Vol. 58, № 2. – P. 269–273.

ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ДИСПЕРСНОСТИ СРЕДЫ НА ПРОЦЕССЫ ОБРАЗОВАНИЯ И РАЗЛОЖЕНИЯ ГИДРАТОВ ПРИРОДНОГО ГАЗА

Калачева Л. П.¹, Иванова И. К.¹, Портнягин А. С.¹, Аргунова К. К.¹, Николаев А. И.¹, Чайникова А. А.²

¹ Институт проблем нефти и газа СО РАН
г. Якутск, Россия

² Северо-Восточный федеральный университет им. М. К. Аммосова
г. Якутск, Россия

Аннотация. В работе исследованы P, T -условия образования и разложения гидратов, а также кинетические параметры этих процессов в дисперсных средах. Установлено, что с увеличением дисперсности образцов температуры переохлаждения и образования гидратов возрастают, а разложение гидратов не зависит от величины удельной поверхности образцов. Установлено, что с уменьшением дисперсности песка индукционный период гидратообразования увеличивается.

В природных условиях процессу гидратообразования способствуют определенные соотношения температуры и давления, наличие водоносных песчаных горизонтов с хорошими коллекторскими свойствами, в которых возможна миграция газа [1, 2]. Поэтому для моделирования гидратообразования в пористых средах в лабораторных экспериментах используют либо песчаные образцы, либо образцы с различным соотношением песка и глины [3, 4]. Пески относятся к капиллярно-пористым телам и по минеральному составу они представляют собой кварц. Известно, что частицы песка не имеют заметной внутренней пористости, доступной для молекул воды. Максимальное количество связанной воды, несмотря на гидрофильность частиц песка, равна только десятым долям процента. В увлажненных песчаных образцах, в зависимости от степени влажности, вода находится в капиллярном и свободном виде и может участвовать в процессе гидратообразования.

В настоящей работе исследуются процессы образования и разложения гидратов природного газа во влажных пористых средах в зависимости от их гранулометрического состава.

Для получения гидратов использовали природный газ Средневилюйского ГКМ, в составе которого преобладает метан (93,9% мол.), дистиллированную воду, 2 образца песка, различающиеся своим гранулометрическим составом. В первом образце преобладает фракция $0,315 \pm 0,2$ мм (73,99% мас.), по классификации Е.М. Сергеева песок относится к средне-мелкозернистым. Во втором образце преобладает фракция $0,4 \pm 0,315$ мм (55,58% мас.) – песок мелко-среднезернистый.

Исследование P, T -условий процесса гидратообразования в дисперсных средах методом ДТА показало, что происходит переохлаждение системы, которое обуславливает зарождение центров кристаллизации и рост гидратов. Температуры переохлаждения и образования гидратов возрастают с увеличением дисперсности образцов, а разложение гидратов не зависит от удельной поверхности образцов.

Увеличение удельной поверхности образцов песков повышает количество поглощенного газа в процессе гидратообразования Δn_g и степень превращения воды в гид-

рат W_h . Скорость гидратообразования $\frac{dn}{dt}$ практически не зависит от величины удельной поверхности образцов. Скорость выделения газа $\frac{dN}{dt}$ при разложении гидратов природного газа практически сопоставима (табл. 1).

За начало процесса нуклеации и дальнейшего роста гидратов принято считать время, при котором наблюдается резкое снижение количества газа в системе, что свидетельствует об образовании гидратов (рис. 1). Это время называется индукционным периодом гидратообразования, который уменьшается с увеличением дисперсности песка.

Таблица 1
Кинетические параметры образования и разложения гидратов природного газа

Кинетические параметры	Природный газ – мелко-средне-зернистый песок				Природный газ – средне-мелкозернистый песок			
	вода	раствор хлорида натрия			вода	раствор хлорида натрия		
		5%	10%	15%		5%	10%	15%
Индукционный период, ч	5,31	5,69	6,38	7,63	4,40	5,60	6,02	6,02
Δn_g , моль	0,0203	0,0105	0,0084	0,0060	0,0174	0,0116	0,0080	0,0068
n_g , моль / моль воды	0,0952	0,0516	0,0435	0,0328	0,0817	0,0575	0,0418	0,0377
W_h , %	53,97	29,23	24,66	18,61	46,33	32,59	23,70	21,39
$\frac{dn}{dt}$, моль/ч	0,0284	0,0213	0,0140	0,0058	0,0769	0,0141	0,0148	0,0140

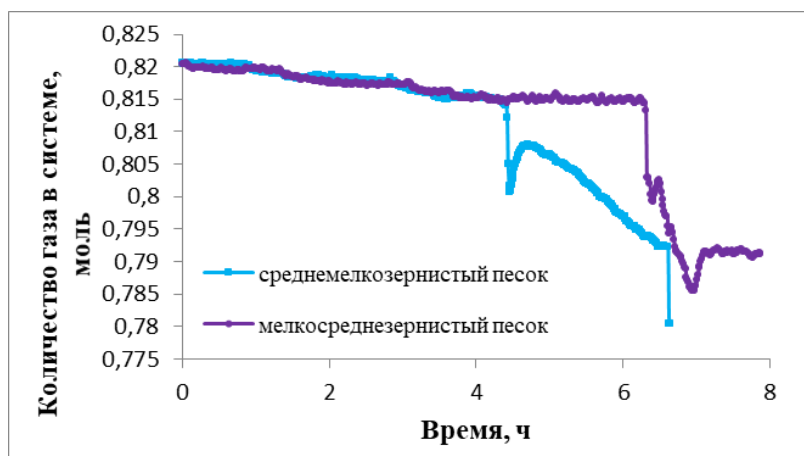


Рис. 1. Зависимость количества газа, поглощенного в процессе гидратообразования от времени

В результате исследований получено, что более интенсивное накопление гидрата природного газа происходит в образце песка с большей дисперсностью за счет увеличения площади удельной поверхности. Полученные результаты могут быть использованы для обоснования возможности создания подземных хранилищ газа в гидратном состоянии в подмерзлотных водоносных горизонтах.

Работа выполнена в рамках Госзадания №АААА-А21-121011490056-4.

Литература

1. Якушев В.С. Природный газ и газовые гидраты в криолитозоне. – М.: Газпром ВНИИГАЗ, 2009. – 192 с.
2. Дучков А.Д., Железняк М.Н., Соколова Л. С., Семенов В.П. Зоны стабильности гидратов метана и диоксида углерода в осадочном чехле Вилюйской синеклизы // Криосфера Земли. – 2019. – Т. XXIII, №6. – С. 19–26.

3. Ji Y.K., Hou J., Cui G.D., Lu N., Zhao E.M., Liu Y.L., Du Q.J. Experimental study on methane hydrate formation in a partially saturated sandstone using low-field NMR technique // Fuel. – 2019. – V. 251. – Pp. 82–90.
4. Uchida Ts.; Takeya S.; Chuvilin E.M., Ohmura R., Nagao J., Yakushev V.S., Istomin V.A., Minagawa H., Ebinuma T., Narita H. Decomposition of methane hydrates in sand, sandstone, clays, and glass beads // Journal of Geophysical Research – Solid Earth. – 2004. – V. 109. – Issue 5. – Pp. 1-12.

ИЗУЧЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ ГИДРАТОВ ПРИРОДНОГО ГАЗА В ДИСПЕРСНЫХ ПОРОДАХ, ЗАСОЛЕННЫХ ХЛОРИДОМ НАТРИЯ

Иванова И. К., Калачева Л. П., Портнягин А. С., Аргунова К. К.
Институт проблем нефти и газа СО РАН
г. Якутск, Россия

Аннотация. В работе рассматриваются результаты исследований процесса гидратообразования природного газа в пористых средах с различной степенью засоления. Засоленность образцов задавалась растворами хлорида натрия различных концентраций. Установлено, что с увеличением концентраций растворов хлорида натрия кинетические параметры гидратообразования уменьшаются. Степень превращения воды в гидрат в пористой среде с пресной водой выше, чем в остальных образцах.

Abstract. The paper considers the results of investigations of the natural gas hydrate formation process in porous media with various degrees of the salinization. Salinity of the samples was given by sodium chloride solutions of various concentrations. It was found that with increasing concentrations of sodium chloride solutions, the kinetic parameters of hydrate formation decrease. The degree of water to hydrate conversion in a porous medium with fresh water is higher than in other samples.

Для создания подземных хранилищ природного газа в гидратном состоянии на территории Якутии необходимо изучить процессы гидратообразования в засоленных пористых средах.

Объектами исследования являлись гидраты природного газа, полученные в образцах мелко-среднезернистого и средне-мелкозернистого песков с разной заданной засоленностью. В мелко-среднезернистом песке 55,58% от общей массы образца приходится на фракцию 0,4–0,315 мм, а в средне-мелкозернистом песке 73,99% составляет фракция 0,315–0,2 мм. Образцам песка задавалась засоленность при помощи растворов хлорида натрия с концентрациями 5, 10 и 15% мас., что соответствует минерализации пластовых вод хлоридно-натриевого типа месторождений Якутии. Для получения газогидратов был использован природный газ Средневилюйского газоконденсатного месторождения (ГКМ) следующего состава (% мол.): CH_4 – 93,9; C_2H_6 – 4,44; C_3H_8 – 1,10; $i\text{-C}_4\text{H}_{10}$ – 0,087; $n\text{-C}_4\text{H}_{10}$ – 0,108; CO_2 – 0,0559; N_2 – 0,33.

Исследование фазовых превращений, происходящих при образовании гидратов природного газа в пористой среде, проводили методом ДТА. В табл. 1 и рис. 1 отражены результаты исследования.

Таблица 1

Количественные характеристики получаемых гидратов

Кинетические параметры	Природный газ – мелко-среднезернистый песок				Природный газ – средне-мелкозернистый песок			
	вода	раствор хлорида натрия			вода	раствор хлорида натрия		
		5%	10%	15%		5%	10%	15%
Индукционный период, ч	5,31	5,69	6,38	7,63	4,40	5,60	6,02	6,02
Δn_g , моль	0,0203	0,0105	0,0084	0,0060	0,0174	0,0116	0,0080	0,0068

n_g , моль / моль воды	0,0952	0,0516	0,0435	0,0328	0,0817	0,0575	0,0418	0,0377
W_h , %	53,97	29,23	24,66	18,61	46,33	32,59	23,70	21,39
$\frac{dn}{dt}$, моль/ч	0,0284	0,0213	0,0140	0,0058	0,0769	0,0141	0,0148	0,0140

Видно (табл.1), что с увеличением концентрации растворов кинетические параметры гидратообразования уменьшаются, что можно объяснить ингибирующим действием солей. Степень превращения воды в гидрат имеет максимальные значения в пресной воде. Следует отметить, что кинетические параметры исследуемых систем также зависят от гранулометрического состава песков. Полученные результаты не противоречат данным работы [1] в которой авторы исследовали образование и разложение гидратов метана, полученных в пористых средах, насыщенных растворами хлорида натрия с концентрациями 1,5 и 3%. Индукционный период гидратообразования удлиняется с увеличением концентрации растворов (рис. 1 (А)). Началу гидратообразования соответствует точка перегиба на кривой изменения давления и всплеск на кривой изменения скорости (рис. 1 (Б)).

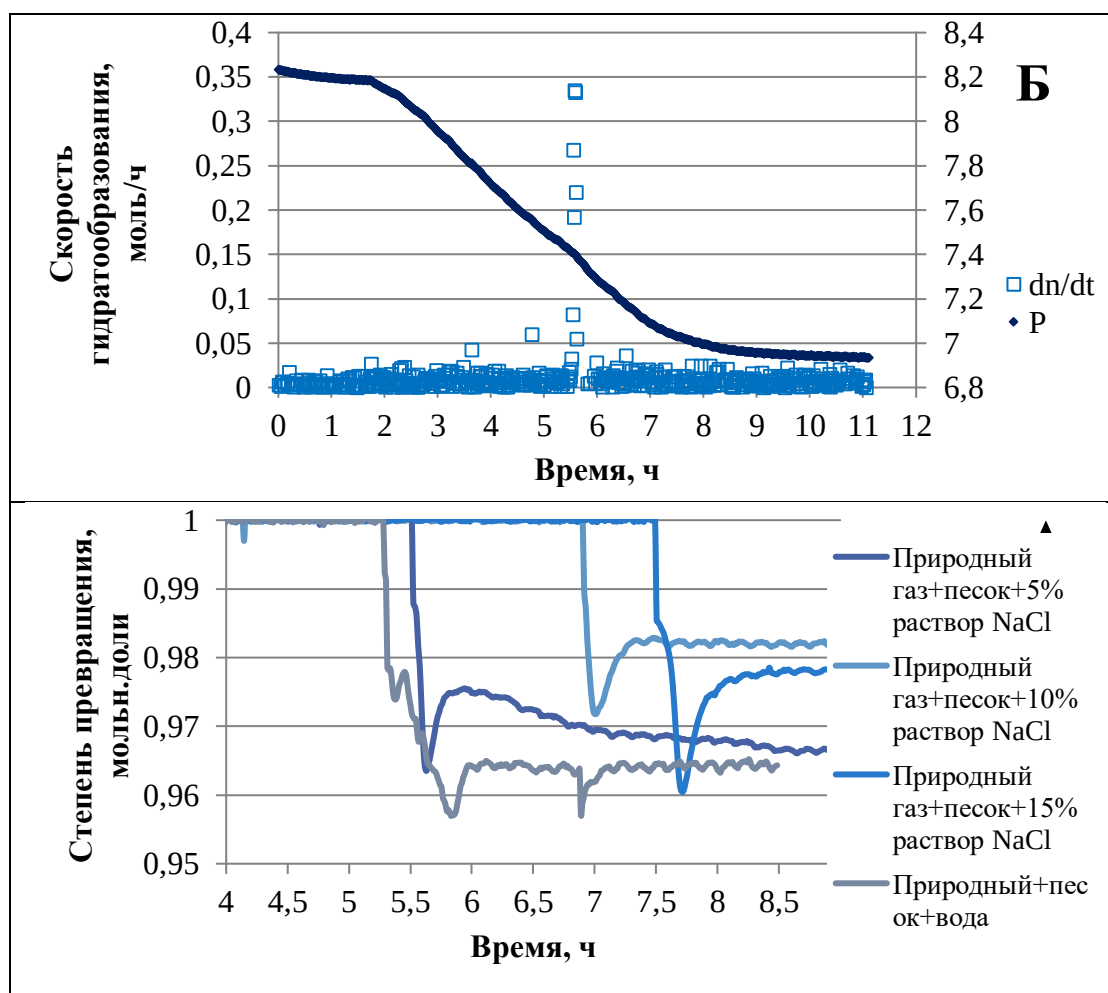


Рис. 1. А – Зависимость количества газа, поглощенного в процессе гидратообразования в различных системах, от времени; Б – изменение давления и скорость образования гидрата природного газа в системе «природный газ+ мелко-среднезернистый песок+ 5% раствор NaCl»

В результате проведенного исследования установлено, что кинетические параметры образования гидратов природного газа зависят от степени засоленности и гранулометрического состава дисперсных пород.

Литература

1. Chong, Zh., Chan, A., Babu, P., Yang, M., Ling, P. Effect of NaCl on methane hydrate formation and dissociation in porous media. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2015. – Vol. 27. – 178-189.

ОСОБЕННОСТИ ГИДРАТООБРАЗОВАНИЯ В РАСТВОРАХ ГИДРОКАРБОНАТА НАТРИЯ

Калачева Л. П., Иванова И. К., Портнягин А. С., Рожин И. И., Аргунова К. К., Николаев А. И.
Институт проблем нефти и газа СО РАН
г. Якутск, Россия

Аннотация. В работе изучается возможность создания подземных хранилищ газа в гидратном состоянии на Якутском поднятии Вилуйской синеклизы. Определены нижние границы зоны стабильности гидратов природного газа на Кенкеменской (1) и Намской (2) площадях, которые при наличии минерализованной воды смещаются вверх. Показано, что в подмерзлотных водоносных горизонтах Якутского поднятия существуют благоприятные условия для образования гидратов природного газа.

Abstract. This paper considers the possibility of the underground gas storage facilities creating in a hydrate state on the Yakut arch of the Vilyui syncline. For this, the lower boundaries of the natural gas hydrate stability zone were determined for Kenkemenskaya (1) and Namskaya (2) areas, which, in the presence of the mineralized water, move upward. It has been shown that there are favorable conditions for the formation of natural gas hydrates in subpermafrost aquifers of the Yakut arch.

Для изучения возможности создания подземных хранилищ газа в гидратном состоянии на северо-западном склоне Якутского поднятия необходимо оценить границы зоны стабильности гидратов (ЗСГ). В качестве перспективных для создания хранилищ газа в гидратном состоянии в подмерзлотных водоносных горизонтах Якутского поднятия выбраны площади: Кенкеменская (1) и Намская (2). На 1 площади глубина залегания нижней границы многолетнемерзлой толщи составляет 380 м, а на 2–480 м; геотермические градиенты – 3,4 и 2,2 °С/100 м, соответственно [1]. В этих горизонтах распространены воды гидрокарбонатно-натриевого типа с минерализацией от 1,0 до 20,0 г/л [2, 3]. Для проведения экспериментов модельные образцы были приготовлены из речного песка и раствора гидрокарбоната натрия с концентрацией 20,0 г/л.

Для определения границ ЗСГ были использованы значения геотермических градиентов площадей [1] и экспериментально полученные равновесные кривые гидратообразования природного газа Средневилуйского ГКМ в модельных образцах влажных незасоленных пористых сред [4], а также в образцах, засоленных раствором гидрокарбоната натрия с концентрацией 20,0 г/л (рис. 1А и 1Б). И для сравнения на полученные схемы нанесены расчетные равновесные кривые гидратообразования метана (расчет по [5]) и природного газа (расчет [6]) в объеме воды.

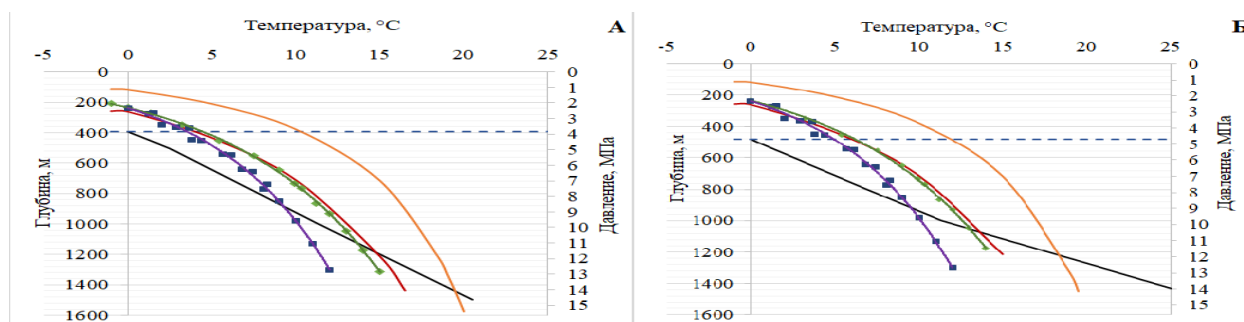


Рис. 1. Схема распространения ЗСГ природного газа на площадях:
А – Кенкеменская; Б – Намская

Условные обозначения: — геотермический градиент; — равновесная кривая «метан-вода» (расчет [20]); — равновесная кривая «природный газ – вода» (расчет [45]); - - - нижняя граница ММТ; ♦ – равновесная кривая «природный газ – песок – вода»; ■ – равновесная кривая «природный газ – песок – раствор NaHCO_3 20,0 г/л»

Нижние границы ЗСГ природного газа экспериментально определены для модельных пористых сред, содержащих пресную и минерализованную воду (табл. 1). Расположение нижних границ ЗСГ на площадях зависят от величины геотермического градиента и концентрации поровой воды. В случае минерализованной воды равновесная кривая гидратообразования природного газа смещена в область низких температур, а при насыщении пресной водой – практически совпадает с расчетной кривой гидратообразования метана.

Нижние границы ЗСГ природного газа в случае пресной воды изменяются от 930 до 1120 м в зависимости от мощности ММТ и геотермического градиента. При наличии в поровом пространстве гидрокарбонатно-натриевой воды с минерализацией 20,0 г/л границы располагаются выше на 80–360 м. Значения глубин нижних границ ЗСГ метана, полученных в настоящей работе, не противоречат данным [7].

Таблица 1

Нижние границы ЗСГ природного газа в модельной пористой среде для пресной и минерализованной воды на площадях Якутского поднятия

Площадь	Нижняя граница ЗСГ, м			
	природного газа			метана
	песок+вода	песок+раствор NaHCO_3 20,0 г/л	вода (расчет)	вода (расчет)
Кенкеменская	1120	880	1450	1180
Намская	1060	920	1220	1080

Показано, что на этих площадях существуют благоприятные условия для формирования гидратов природного газа. Экспериментально определены нижние границы ЗСГ природного газа в пористых средах, насыщенных гидрокарбонатно-натриевым типом вод. На нижние границы ЗСГ оказывает влияние минерализация поровых вод, которая уменьшает мощность ЗСГ. При проектировании хранилища необходимо учитывать два фактора: во-первых, кровля хранилища должна располагаться ниже нулевой изотермы, поскольку образование гидратов является экзотермическим процессом, а выделяемая теплота может привести к уменьшению толщины криолитозоны; во-вторых, подошва хранилища не должна достигать нижней границы ЗСГ, так как ее положение не постоянно.

Литература

1. Железняк, М.Н., Семенов, В.П. Геотемпературное поле и криолитозона Вилуйской синеклизы. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2020. – 123 с.
2. Геология и нефтегазоносность осадочных бассейнов Восточной Сибири. – Ленинград: Недра, 1980. – 200 с.
3. Грубов, Л.А., Славин, В.И. Сравнительная оценка гидрогеологических условий различных районов Якутского артезианского бассейна в связи с нефтегазоносностью. В книге «Гидрогеологические исследования в нефтегазоносных районах». Ленинград: Изд-во ВНИГРИ, 1971. – С. 184–203.
4. Kalacheva, L.P., Ivanova, I.K., Portnyagin, A.S. (2021). Equilibrium Conditions of the Natural Gas Hydrates Formation in the Pore Space of Dispersed Rocks. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science, 666(4), 042062.
5. Sloan, E.D., Koh, C.A. Clathrate hydrates of natural gases. Boca Raton: Taylor&Francis Group/CRC Press, 2008. – 720 p.
6. Калачева Л. П., Рожин И. И., Федорова А.Ф. Изучение влияния минерализации пластовой воды на процесс гидратообразования природных газов месторождений востока сибирской платформы. SOCAR Proceedings, 2017. – Vol. 2, Pp. 56–71.

7. Дучков, А.Д., Железняк, М.Н., Соколова, Л. С., Семенов, В.П. Зоны стабильности гидратов метана и диоксида углерода в осадочном чехле Вилуйской синеклизы. Криосфера Земли, 2019. – Vol. XXIII(6). – 19–26.

МЕХАНИЗМ И КИНЕТИКА ГИДРАТООБРАЗОВАНИЯ МЕТАНА В РАСТВОРАХ ХЛОРИДА НАТРИЯ

Нестеров А. Н., Решетников А. М.
Институт криосферы Земли ТЮМНЦ СО РАН
Тюмень, Россия

Аннотация. Приводятся результаты сравнительного изучения кинетики гидратообразования метана для чистой воды и 3 % водного раствора NaCl при изохорном охлаждении без перемешивания. Результаты кинетических исследований дополнены данными визуального изучения морфологии растущих гидратов. Установлено, что добавка соли приводит к увеличению конверсии воды в гидрат и скорости гидратообразования метана. На основании полученных данных анализируются возможные механизмы роста газовых гидратов с добавкой соли.

Abstract. Results on a study of methane hydrate formation kinetics for pure water and a 3% NaCl water solution during isochoric cooling without stirring are presented. Results of the kinetic studies are supplemented with data from a visual study of the morphology of formed hydrates. It was found that the addition of salt increased in both the conversion of water- to-hydrate and the hydrate formation rate. The possible mechanisms of the hydrate growth with the addition of salt are analyzed.

Интерес к изучению кинетики гидратообразования газов в растворах неорганических солей связан с перспективами прямого использования пластовых минерализованных вод и морской воды для получения газовых гидратов в технологиях транспорта, хранения и утилизации природных и техногенных газов в форме гидратов.

Цель настоящей работы – оценить влияние добавки соли (NaCl) на механизм и кинетику гидратообразования газов. Для этого изучена кинетика гидратообразования метана в водном растворе NaCl и выполнен цикл визуальных исследований влияния добавки соли на морфологию образующихся гидратов.

В кинетических экспериментах гидраты метана получали при изохорном охлаждении без перемешивания для трех начальных значений давления 8, 12 и 16 МПа. В качестве кинетических характеристик измерены индукционные периоды гидратообразования и рассчитаны кинетические кривые конверсии воды в гидрат и скорости роста газовых гидратов. Установлено, что добавка 3 % соли слабо влияет на величину индукционного периода гидратообразования метана, однако при начальном давлении 8 МПа добавка соли на порядок увеличивает степень конверсии воды в гидрат и скорость гидратообразования метана по сравнению с гидратообразованием в чистой воде. Увеличение давления до 12 МПа не повлияло на степень конверсии и скорость гидратообразования в присутствии соли, однако, при 16 МПа конверсия воды в гидрат и скорость гидратообразования заметно уменьшились.

Для изучения морфологии образующихся гидратов использовали реактор, оборудованный смотровыми окнами. Визуальные наблюдения показали, что если для чистой воды основной рост гидратов происходит на межфазной границе газ-жидкость, то с добавкой соли гидраты растут на стенках реактора вверх от поверхности свободной жидкости. Рост гидратной корки на поверхности чистой воды препятствует гидратообразованию метана, поэтому конверсия воды в гидрат не превышает 1–2 %. Такой механизм роста гидратов известен как пленочно-диффузионный [1]. С добавкой соли, пористые гидратные отложения образуются на стенках реактора, а гидратная суспензия на поверхности раствора не является препятствием для миграции раствора в поры гидратных отложений на поверхности реактора. Под действием капиллярных

сил раствор из объема реактора фильтруется в поры гидратов на стенках реактора. Уровень свободной жидкости в реакторе постоянно уменьшается пока вся жидкость не перейдет в поры гидратов, а поверхность гидратной фазы на стенках реактора резко увеличивается. Движение воды в порах гидратов приводит к постоянному обновлению газо-водяного контакта, что приводит к сохранению высокой скорости гидратообразования и степени конверсии воды в гидрат по сравнению с гидратообразованием в чистой воде. Такой механизм роста впервые наблюдался для гидратообразования газов с добавкой поверхностно-активных веществ [2] и известен как капиллярный [3]. В наших экспериментах конверсия воды в гидрат при изохорном гидратообразовании метана с добавкой 3% NaCl при начальном давлении 8 МПа составила 20%. Однако, при увеличении давления до 16 МПа увеличивается толщина слоя гидратной суспензии на поверхности жидкой фазы, что приводит к уменьшению ее гидропроводности и замедлению гидратообразования на стенках реактора. Поэтому, с увеличением давления конверсия воды в гидрат и скорость гидратообразования уменьшаются.

В результате выполненных исследований полученные результаты, имеющие значение для понимания механизма гидратообразования газов с добавкой NaCl и выбора оптимальных p - T условий гидратообразования газов с использованием минерализованных пластовых вод и морской воды в гидратных технологиях хранения, транспортирования и утилизации природных и техногенных газов.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Тюменской области в рамках научного проекта № 20-43-720002.

Литература

1. Макогон Ю. Ф. – М: Изд-во «Недра», 1974 – 208 с.
2. Кутергин О.Б., Мельников В.П., Нестеров А. Н. Влияние поверхностно-активных веществ на механизм и кинетику гидратообразования газов // Доклады Академии Наук. – 1992.- Т.23, №3. – С.549-552.
3. Okutani K., Kuwabara Y., Mori Y.H. Surfactant effects on hydrate formation in an unstirred gas / liquid system: an experimental study using methane and sodium alkyl sulfates // Chemical Engineering Science. – 2008. –Vol. 63. – Pp.183–194.

Геотеплофизика

Мерзлотоведение. Горная теплофизика. Теплофизика ландшафтов

ДИНАМИКА ТЕПЛОВОГО РЕЖИМА СИЛЬНОЛЬДИСТОГО ГРУНТОВОГО ОСНОВАНИЯ ЖЕЛЕЗНОЙ ДОРОГИ ПРИ ПРИМЕНЕНИИ ИННОВАЦИОННЫХ ПРИЕМОВ

Варламов С. П., Скрябин П. Н.
Институт мерзлотоведения им. П. И. Мельникова СО РАН
Якутск, Россия

Аннотация. Представлены результаты инженерно-геокриологического мониторинга железнодорожной линии Томмот–Нижний Бестях на участке распространения пород ледового комплекса, где использовано инновационное проектирование. Количественно оценена динамика теплового состояния грунтов основания и тела земляного полотна железной дороги разных конструкций при широком применении вертикальных сезонно-охлаждающих устройств (СОУ) и теплоизоляционных материалов.

Ключевые слова: насыпь, земляное полотно, железная дорога, теплоизоляционные материалы, термосифоны, температура, верхняя граница мерзлоты.

DYNAMICS OF THE THERMAL REGIME IN ICE-RICH SUBGRADE OF RAILWAY EMBANKMENTS WITH INNOVATIVE PROTECTION METHODS

Varlamov S. P., Skryabin P. N.
Melnikov Permafrost Institute SB RAS
Yakutsk, Russia

Abstract. This paper presents the results of geocryological monitoring in the ice-rich section of the Tommot – Nizhny Bestyakh Railway where innovative permafrost protection techniques were used. Quantitative assessment of changes in the thermal state of soils in and below the embankments of different designs with thermosyphons and insulation is provided.

Keywords: embankment, subgrade, railway, insulation, thermosyphons, temperature, permafrost table.

Тепловое состояние грунтов является одним из основных факторов определяющих устойчивость природно-технических систем (ПТС) в криолитозоне. Железнодорожная линия Томмот–Нижний Бестях пересекает на 692–734 км участке распространения пород ледового комплекса, где суммарная объемная льдистость грунтов в слое годовых теплооборотов достигает 0,7–0,8 д.е. Подземные льды залегают в интервале глубин 1,5–12,0 м. В условиях современного потепления климата обеспечение устойчивости ПТС является весьма актуальной задачей. Исследования проведены методом многолетних теплофизических экспериментальных натурных наблюдений с применением инновационных приемов.

В районе пикетов (ПК) 6926 и 6934 грунты основания под высокими (7–8 м) насыпями начали охлаждаться с первого года их отсыпки, где установлено поднятие верхней границы многолетнемерзлых пород на 1 м уже к концу теплого сезона 2009 г. По температурным данным за десять лет эксплуатации насыпи верхняя кромка мерзлоты приподнялась на 3,5–4,5 м от уровня первоначального естественного залегания. Мерзлые грунты основания под этими насыпями находятся в устойчивом состоянии.

На участке ПК 6932 земляное полотно высотой 2–3 м возведено с установкой на бермах СОУ и укладкой на основании бермы и насыпи теплоизоляционного материала из пеноплекса. Здесь под основанием насыпи на глубинах 1,7–3,5 м залегает подземный лед мощностью до 6,5 м. Применение вертикальных парожидкостных СОУ на бермах в сочетании теплоизоляционным материалом из пеноплекса в основании земляного полотна привело к стабильному охлаждению грунтов и поднятию верхней кровли многолетнемерзлых пород, что обеспечивает устойчивость грунтов под земляным полотном.

На участке ПК 7088 в основании земляного полотна высотой 2,5–3,0 м многолетнемерзлые грунты представлены супесями и суглинками текучей консистенции. Слева от земляного полотна на глубинах 2,3–3,0 м от поверхности залегает подземный лед мощностью 5,0–8,0 м. Конструкции консольных солнцезащитных навесов, расположенные на средней части откосов насыпи в первые зимние сезоны после возведения не оказали должного охлаждающего эффекта на грунты основания земляного полотна. В последующие зимы при быстром промерзании сезонного слоя, отмечен заметный охлаждающий эффект навесов на грунты основания земляного полотна. По оси насыпи интенсивное охлаждение грунтов основания земляного полотна выявлено только в третью зиму. Спустя 10 лет продолжается тенденция охлаждения грунтов основания насыпей. Но одновременно между насыпью и левым валиком продолжается процесс деградации мерзлоты, обусловленный оттаиванием подземных льдов.

На участке ПК 7175 в начале теплого сезона 2009 г. была начато возведение насыпи с частичным удалением грунтов деятельного слоя и заменой их скальными породами. К концу лета грунты основания насыпи до глубины 1 м были талыми, а на глубинах 3 и 5 м температуры грунтов по сравнению с осенью 2008 г. почти не изменились. В зимний сезон 2009/2010 гг. здесь была сооружена насыпь до проектного уровня со сложной конструкцией (высокими боковыми бермами). В августе 2010 г. по данным бурения верхняя граница многолетнемерзлых пород находилась на глубине 3 м от поверхности насыпи. В 2011 г. эта граница отмечена ниже (1,5 м). В 2011–2019 гг. верхняя граница многолетней мерзлоты колебалась по глубине в пределах 4,3–4,8 м. Отмечено существенное понижение температуры грунтов основания высокой (5 м) левой бермы. Незначительное понижение температуры зафиксировано под невысокой (3 м) правой бермой. В 2012 г. под правой бермой верхняя кровля многолетней мерзлоты приподнялась до уровня естественной поверхности, а под левой мерзлые грунты отмечены уже в теле высокой бермы. По состоянию на 2019 г., грунты основания под высокими бермами характеризуются тенденциями к охлаждению, а под насыпью – к повышению температуры.

На участке ПК 7179 была сооружена нулевая насыпь с удалением грунтов деятельного слоя и заменой его скальными грунтами. Бурение и оборудование термических скважин произведено в конце августа 2009 г. после возведения земляного полотна. При бурении скважин глубина протаивания от поверхности насыпи составляла 2,5–3,0 м при мощности скального грунта 2,2 м. Под осью земляного полотна на глубине 3,8 м встречается подземный лед мощностью до 1 м. Однако с первого года сооружения насыпи выявлено формирование многолетней чаши протаивания, угрожающая устойчивости земляного полотна. Следует отметить, что этот процесс деградации продолжается. Глубина протаивания уже превысила 4 м, температура грунтов основания земляного полотна сохраняет тенденцию к дальнейшему повышению.

Геокриологический мониторинг в период эксплуатации железной дороги установил деградацию мерзлых пород ледового комплекса на откосах и днищах выемок. Слабым местом выемок, проложенных по сильнольдистым грунтам, являются откосы в местах контакта подстилаемых льдистых грунтов со скальными грунтами, особенно в его верхней части. На выемке после строительства земляного полотна динамика температура грунтов основания показывает его изменения в сторону потепления, что

угрожает его устойчивости. На бортах откосов выемки температура грунтов имеет тенденцию к повышению, но под валиками, к понижению.

Организация наблюдательной сети осуществлены при финансовой поддержке Министерства транспорта Республики Саха (Якутия), многолетние режимные наблюдения за тепловым состоянием грунтов проведены в рамках приоритетных направлений и программ фундаментальных исследований СО РАН.

Работа подготовлена при поддержке гранта РФФИ р_а 18-41-140008, ГФЕН_а 20-55-53036.

УСТОЙЧИВОСТЬ МЕРЗЛОТНЫХ ЛАНДШАФТОВ КРИОЛИТОЗОНЫ ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЯКУТИИ К СОВРЕМЕННОМУ ПОТЕПЛЕНИЮ КЛИМАТА

Варламов С. П., Скачков Ю. Б., Скрыбин П. Н.
Институт мерзлотоведения им. П. И. Мельникова СО РАН
Якутск, Россия

Аннотация. По итогам анализа 40-летнего геокриологического мониторинга естественных нетронутых деятельностью человека мерзлотных ландшафтов количественно определена реакция теплового состояния верхних горизонтов криолитозоны на современное потепление климата.

Ключевые слова: потепление климата, мерзлотные ландшафты, деятельный слой, слой годовых колебаний температуры, температура грунтов, тренд, устойчивость.

STABILITY OF PERMAFROST LANDSCAPES IN CENTRAL YAKUTIA UNDER RECENT CLIMATE WARMING

Varlamov S. P., Skachkov Yu. B., Skryabin P. N.
Melnikov Permafrost Institute SB RAS
Yakutsk, Russia

Abstract. Based on the analysis of data from 40 years of geocryological monitoring in natural, undisturbed permafrost landscapes, this study provides a quantitative assessment of the thermal response of near-surface permafrost to recent climate warming.

Keywords: climate warming, permafrost landscapes, active layer, layer of annual temperature fluctuations, ground temperature, trend, stability.

Изучение термической устойчивости литогенной основы естественных нетронутых деятельностью человека мерзлотных ландшафтов криолитозоны в условиях современного потепления климата является весьма актуальной задачей. При оценке эволюции криолитозоны в основном характеризуют количественную взаимосвязь между приращениями температуры воздуха и температуры грунтов в слое годовых теплооборотов. Представляет интерес сравнение современных трендов изменения температуры воздуха и температуры грунтов на глубине 10 м.

По итогам многолетних наблюдений за тепловым состоянием грунтов естественных ландшафтов по типам местности определены тренды среднегодовой ($\alpha T_{\text{вг}}$) и среднелетней температуры воздуха ($\alpha T_{\text{вл}}$), тренды мощности сезонно-талого слоя ($\alpha \xi$) и температуры грунтов на глубине 10 м (αT_0).

На основе анализа связи между трендами αT_0 и $\alpha T_{\text{вг}}$ выявлена значимая зависимость в увлажненных более теплопроводных отложениях мелкодолинного и межгрядово-низинного типах местности, слабая в межаласном типе местности. В песчано-

грядовом типе местности наблюдается обратная связь обусловленная преобладанием иссушенных слабо теплопроводных песчаных грунтов. В плакорном, аласном и низкотеррасовом типах местности, из-за короткого ряда наблюдений, сложно установить зависимости между трендами αT_0 и $\alpha T_{\text{вг}}$. В ландшафтных комплексах мелкодолинного, низкотеррасового и пойменного типов местностей при современном потеплении отмечается тенденция к охлаждению грунтов, что видимо, вызвано затеняющей ролью интенсивно произрастающей растительности.

Не выявлено четкой эмпирической зависимости между трендами $\alpha \xi$ и $\alpha T_{\text{вл}}$ песчано-грядовом, отчасти межаласном типах местности. Слабая зависимость проявляется в некоторых урочищах межаласного и межгрядово-низинного типах местности. Значимая зависимость отмечается осоково-сфагновом ернике тылового шва надпойменной террасы мелкодолинного типа местности, из-за интенсивного произрастания густого зарослей ерников.

Для определения устойчивости мерзлых толщ и их чувствительности к изменениям климата нами принят безразмерный коэффициент $K_\alpha = \alpha T_0 / \alpha T_{\text{air}}$, предложенный А. В. Павловым [2008]. При значениях $K_\alpha \leq 0,50$ отмечается высокая термическая устойчивость мерзлых грунтов, при $0,5 < K_\alpha \leq 0,75$ – средняя устойчивость и при $K_\alpha > 0,75$ – слабая устойчивость мерзлых грунтов. В Центральной Якутии K_α в плакорном типе местности изменяется от 0,15 до 0,55, в межаласном колеблется в пределах 0,11–0,53, песчано-грядовом – 0,07–0,08, межгрядово-низинном 0,14–0,22, мелкодолинном – 0,31–0,32. В ландшафтных комплексах аласного, пойменного, низкотеррасового и отчасти в некоторых природных комплексах песчано-грядового, мелкодолинного типов местностей встречается охлаждение грунтов, значение K_α отрицательные. В целом литогенная основа природных комплексов региона в условиях современного потепления климата относится преимущественно к высокой термической устойчивости мерзлых грунтов. На локальных участках плакорного и межаласного типов местности грунты относятся к средней устойчивости.

По реакции на климатические колебания (потепление) типы местности можно подразделить на 3 категории – высоко-, средне- и слабочувствительные, составляющие следующий ландшафтный ряд: мелкодолинный, пойменный – межаласный, песчано-грядовой, межгрядово-низинный – плакорный, склоновый, аласный, низкотеррасовый. Межгодовые изменения температуры грунтов на подошве слоя годовых теплооборотов по категориям варьируют соответственно в пределах: 0,9–4,1; 0,4–1,8; 0,3–0,9 °C. Межгодовая изменчивость мощности деятельного слоя от ее многолетних средних значений по категориям составляет соответственно: 34–172, 14–75 и 4–47 %.

Несмотря, на одно из наибольшего потепления современного климата в Центральной Якутии по сравнению с другими северными регионами России, изменение термического состояния слоя годовых теплооборотов в естественных лесных ландшафтах Центральной Якутии выражено слабо. Современный период характеризуется в целом достаточной термической устойчивостью как высокотемпературных, так и низкотемпературных многолетнемерзлых пород. Основными регулирующими факторами динамики теплового состояния грунтов мерзлотных ландшафтов является режим снегонакопления и увеличение биомассы. На открытых луговых ландшафтах тенденция повышения среднегодовой температуры грунтов в 2 раза больше, чем в лесных комплексах. Глубина теплового проникновения современного потепления климата на луговых участках составила 40–50 м. Температура грунтов глубже 60 м находится в стационарном состоянии. Короткопериодные колебания температуры грунтов последних лет обусловлены в основном влиянием аномально многоснежных и аномально малоснежных зим.

Глубина сезонного протаивания грунтов в естественных ландшафтах является достаточно стабильной и характеризуется малой межгодовой изменчивостью, слабо

реагирует на потепление климата и имеет разнонаправленные тенденции. Тенденция возрастания глубины сезонного протаивания статистически незначимая.

Литогенная основа природных комплексов региона в условиях современного потепления климата относится преимущественно к категории высокой термической устойчивости мерзлых грунтов. В урочищах плакорного и межаласного типов местности грунты относятся к категории высокой и средней термической устойчивости.

Многолетние режимные наблюдения за тепловым состоянием грунтов проведены в рамках приоритетных направлений и программ фундаментальных исследований СО РАН.

Работа подготовлена при поддержке гранта РФФИ р_а 18-41-140008.

Литература

1. Павлов А. В. Мониторинг криолитозоны. – Новосибирск: Академическое изд-во «Гео», 2008. – 229 с.

ВЛИЯНИЕ СЕЗОННЫХ КОЛЕБАНИЙ ТЕМПЕРАТУРЫ МЕРЗЛЫХ ГРУНТОВ НА СТЕПЕНЬ ИХ РАСТЕПЛЕННОСТИ И ПРОМОРОЖЕННОСТИ ПО ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ ХАРАКТЕРИСТИКАМ

Ефремов В. Н.

Институт мерзлотоведения им. П. И. Мельникова СО РАН
Якутск, Российская Федерация

Аннотация. Сезонные колебания температуры мерзлых грунтов вызывают изменения их льдистости, сопровождающиеся изменением их электрического сопротивления. При резком таянии либо промерзании грунтов деятельного слоя, в нем происходит электромагнитная эмиссия мерзлых грунтов. Эти обстоятельства используются для мониторинга и прогноза изменения состояния мерзлых грунтов под климатическим или техногенным воздействием.

Abstract. The seasonal fluctuations of temperature of frozen grounds cause changes in their ice content, accompanying by change of their resistivity. At sharp thawing or freezing of grounds of active layer, in it there is electromagnetic emission of frozen grounds. These circumstances are used for monitoring and forecast of change of condition of frozen grounds under climatic or technological influence.

Колебания температуры грунтов криолитозоны, вызванные годовым теплооборотом, воздействуют на состояние грунтов в разной форме по сезонам. Мерзлоте и талому состоянию грунтов, а также степени их промороженности и растепленности соответствуют определенные электромагнитные характеристики [1]. Мониторинг электромагнитных характеристик грунтов используется нами, для оценки состояния грунтов, применением радиоимпедансного (РИЗ) и радиоманнитотеллурического (РМТ) зондирования.

Результатами мониторинговых исследований в пригороде Якутска показано, что электрическое или электромагнитное [2] сопротивление позволяют качественно оценить степень их растепленности и промороженности, что затруднительно осуществить по температурным измерениям. Под степенью растепленности грунтов понимается снижение их льдистости, а под степенью промороженности грунтов – повышение их льдистости.

Полная растепленность, как и полная промороженность грунтов реализуемы для грунтов деятельного слоя. Здесь, на частоте 864 кГц видны полная растепленность грунтов, соответствующая минимальным значениям эффективного сопротивления в июле, и полная промороженность грунтов при его максимальных значениях в феврале (рис. 1а).

Для подстилающих деятельный слой многолетнемерзлых грунтов растепленность и промороженность неполны и достижимы лишь частично. Частичная растепленность грунтов соответствует пониженным значениям в августе-октябре. Частичная промороженность грунтов соответствует повышенным значениям эффективного сопротивления на частоте 171 кГц в ноябре-январе, которые еще более возрастают в феврале-марте (рис. 1б).

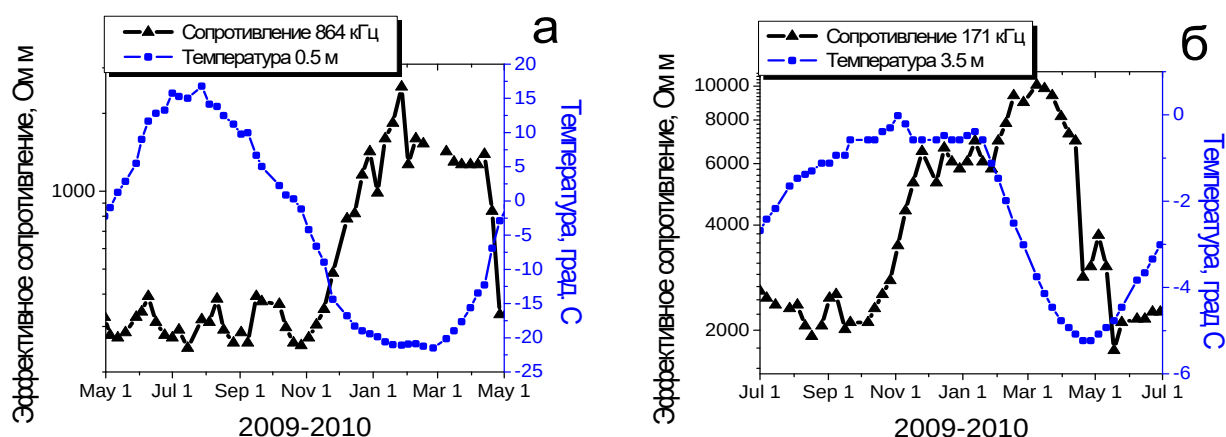


Рис. 1. Сезонные изменения температуры грунтов на глубине 0,5 м (а) и на глубине 3,5 м (б) в сравнении с сезонными изменениями эффективного сопротивления на частотах 864 (а) и 171 кГц (б) по результатам РИЗ

Другим результатом мониторинговых исследований было наблюдение повышения уровня напряженности магнитного поля на частотах диапазона 1–300 кГц в апреле-мае и сентябре-октябре. Данные этих наблюдений позволили нам открыть явление электромагнитной эмиссии мерзлых грунтов [1, 3]. Электромагнитная эмиссия происходит в мерзлых грунтах при наличии в них объемных деформаций, произошедших в результате резкого оттаивания, либо промерзания грунтов деятельного слоя. Например, вызванная электромагнитной эмиссией, максимальная амплитуды шумовой составляющей спектра частот в диапазоне 6–200 кГц выросла в весенние дни 2020 года более, чем на порядок – с 24 мкВ на 18 апреля до 340 мкВ на 23 апреля (рис. 2). Повышение амплитуды сигналов электромагнитной эмиссии мерзлых грунтов произошло благодаря увеличению механических напряжений, вызванных объемными деформациями в грунтах деятельного слоя, в результате таяния в них промерзшей за зиму воды. Причиной этому послужило резкое повышение температуры приземного воздуха от +0.2°C 21 апреля до +7.°C 23 апреля.

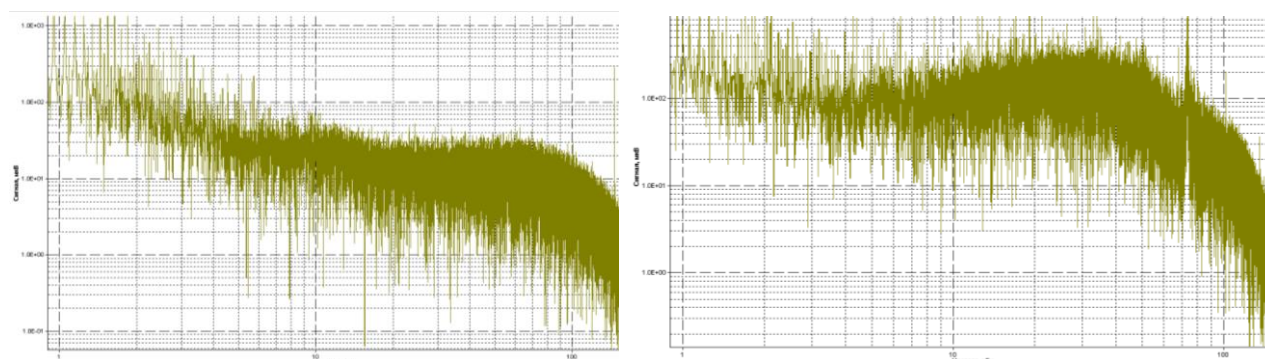


Рис. 2. Амплитудные спектры сигналов H_z в диапазоне частот 1-200 кГц, принятых РМТ аппаратурой 18 (слева) и 23 (справа) апреля 2020 г.

Мониторинг сезонных изменений электрического, либо электромагнитного, сопротивления грунтов позволит оценить их промороженность и растепленность, а с учетом изученного влияния климатических факторов, оперативно спрогнозировать дальнейшее изменение их состояния.

Наблюдение электромагнитной эмиссии мерзлых грунтов поможет оперативным обнаружением значительного протаивания дисперсных грунтов спрогнозировать аварийные ситуации в основаниях зданий и инженерных сооружений.

Литература

1. Ефремов В.Н. Геофизическая оценка и индикация результата воздействия климатических факторов на состояние мерзлых грунтов // БСТ. Бюллетень строительной техники. – № 12 (1024), 2019. – Стр. 46-50.
2. Ефремов В.Н. Возможности регистрации геофизических аномалий от талых и водоносных горизонтов в мерзлых толщах // Криосфера Земли. – 2017. – Т. XXI, № 6. – С.129–133.
3. V N Efremov. Influence of the Phase Transitions of Water in Permafrost on Natural and Technological Electromagnetic Fields // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Volume 753, 2020 International science and technology conference "FarEastCon-2019" 1-4 October 2019, Russky Island, Russian Federation. Number 5, March 2020. Chapter 4. 052012 p 6.

ФОРМИРОВАНИЕ ТАЛИКОВ В ОСНОВАНИИ ЗДАНИЙ ЯКУТСКОЙ ТЕПЛОЙ ЭЛЕКТРОЦЕНТРАЛИ В ПРОЦЕССЕ ЕЁ ДЛИТЕЛЬНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Заболотник С. И., Заболотник П. С.
Институт мерзлотоведения им. П. И. Мельникова СО РАН
Якутск, Россия

Якутская тепловая электроцентраль (ЯТЭЦ) была введена в постоянную эксплуатацию 7 ноября 1937 г. и с тех пор обеспечивает город Якутск электроэнергией, а с 1961 г. и теплом [1]. ЯТЭЦ является первым промышленным объектом СССР, построенным по принципу использования вечномёрзлых грунтов в качестве его основания.

Сохранение многолетнемёрзлого состояния грунтов основания было обеспечено путём установки здания на колонны, поднимающие его над поверхностью земли. Между поверхностью грунта и зданием было оставлено сквозное проветриваемое подполье высотой 1,2-1,8 м, предназначенное для защиты грунтов от глубокого оттаивания под воздействием внутреннего тепла здания, а также для накопления запасов холода в них в зимнее время.

Фундаменты первой очереди ЯТЭЦ представляют собой отдельно стоящие через 5–7 м железобетонные колонны с башмаками. В зависимости от запроектированной нагрузки колонны имеют сечение от 30×30 до 80×80 см, а башмаки основания – от 130×130 до 317×317 см. Фундаменты установлены на глубину 4,5 м от поверхности площадки на ростверк, состоящий из двух рядов лиственничных брусков сечением 20×20 см, уложенных в перекрёстном направлении. Фундаменты под турбогенераторы выполнены в виде сплошных бетонных плит площадью около 60 м² и толщиной 1 м, уложенных на ростверк из расположенных в перекрёстном направлении пяти рядов лиственничных брусков. Кирпичные стены здания покоятся на мощных железобетонных монолитных рандбалках, которые жёстко связаны с колоннами [2].

В процессе длительной эксплуатации под зданиями и на прилегающих к ним участках образовались таликовые зоны мощностью до 19-25 м. с положительными температурами, достигающими +7°С и более.

Результаты многолетних исследований на территории ЯТЭЦ показывают, что главной причиной образования таликов под зданиями и прилегающими к ним территориями являются утечки горячей и агрессивной сетевой воды. Они практически ежегодно фиксировались нами при измерении температуры грунтов под различными частями сооружений. Наиболее сильное растепление произошло под южной частью главного корпуса, в результате которого к ноябрю 2019 г. грунты оттаяли гораздо

глубже основания фундаментов (до 10–15 м и ниже), а талик распространился не только на всю южную половину главного корпуса, но и вышел за его пределы и соединился с таликом, находящимся вокруг циркуляционной насосной станции (рис. 1 и 2). Причём, очень сильному разогреву подверглась не только верхняя часть основания. В образовавшемся объединённом талике даже на глубине 10 м температура колебалась в пределах от +8,9 до +12,6°C. Дальнейшее её повышение может привести к оттаиванию нижележащих льдистых отложений, которое будет сопровождаться неравномерными просадками, превышающими допустимые пределы.

Занимавший в 2013 г. большую часть основания здания водогрейных котлов (ЗВК) талик все последующие годы постепенно промерзал сверху, достигнув глубины более 4 м. К настоящему времени под слоем сезонного промерзания оттаявшие грунты остались только под юго-восточной частью здания (рис. 1).

В то же самое время на глубине 10 м таликовая зона сохранилась почти под половиной ЗВК и распространилась до далеко за его пределы (рис. 2).

Под зданием углекислотного цеха (УКЦ) сохранились 2 разобщённых талика. В месте его примыкания к главному корпусу, где расположена скважина 11т, произошло очередное растепление ствола скважины, когда к 15 ноября 2019 г. на глубине 2,0–2,5 м температура повысилась до +2,4°C, хотя на забое она, наоборот, понизилась до 0°C. Под восточным углом УКЦ происходило постепенное восстановление температуры грунтов, хотя в интервале 7–11 м сохранился талик с близкими к нулю отрицательными температурами (рис. 2).

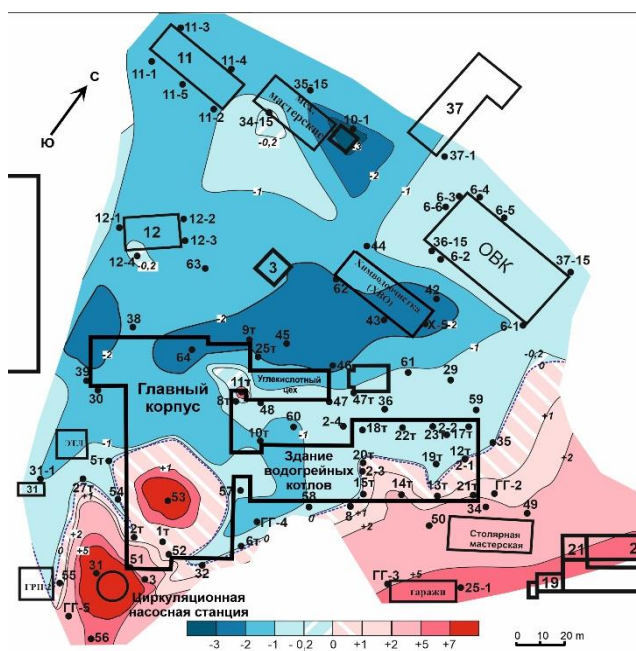


Рис. 1. Температурное поле на глубине 4 м.
●53, ●11т, ●ГГ-2 и др. – скважины и их номер.

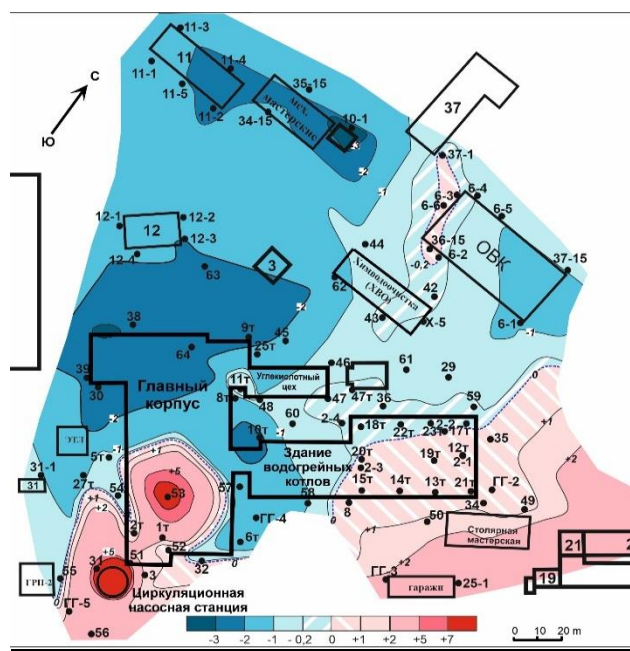


Рис. 2. Температурное поле на глубине 10 м.

Фундаменты здания химводоочистки опираются на мёрзлое основание. Тем не менее, под восточной его частью находится заглубленный талик. К 12 ноября 2019 г. около северо-восточного угла здания он промёрз до глубины 9 м, а вблизи южной стены – почти до 10 м.

Заглубленный талик в интервале 5–10 м установлен также под западной частью Объединённо-вспомогательного комплекса (ОВК) с близкими к нулю температурами (рис. 2). Время его образования и причины неизвестны, так как ранее вокруг ОВК измерения температуры не проводились. Судя по безградиентному характеру температурных кривых, в этом месте также идёт восстановление естественных мерзлотных условий.

Рассматривая геокриологическую обстановку на территории ЯТЭЦ в целом, необходимо отметить, что грунты в основании большинства сооружений растеплены. Через 10 лет после ввода ЯЦЭС в эксплуатацию температура грунтов по данным Н. И. Салтыкова на глубине 5 м изменялась от $-3,2$ до $-3,6^{\circ}\text{C}$ [2]. В настоящее время на глубине 4 м (близкой к заложению основания фундаментов) она изменяется под большей частью зданий от $-0,2$ до $-2,0^{\circ}\text{C}$ и лишь на небольших участках – от $-2,0$ до $-3,0$ (см. рис. 1). Аналогичная картина наблюдается и на глубине 10 м, где температура грунтов ниже -3°C установлена только под западным углом главного корпуса и на прилегающей к нему с северо–запада части территории (см. рис. 2).

За более чем 80-летний период эксплуатации ЯТЭЦ сформировавшиеся под зданиями локальные талики проникли на достаточно большую глубину. Например, пробуренные в 2019 году двадцатиметровые скважины 2-1 и 2-2 (см. рис. 2) нижней границы талика не достигли, хотя температура грунтов на забое была близка к 0°C .

Литература

1. Над Леной ТЭЦ – как бригантна / под ред. Л. Завацкой, Т. Данилевской. Красноярск: изд-во Платина, 2007. 136 с.
2. Цытович Н.А., Салтыков Н. И., Жуков В.Ф., Мельников П. И. Фундаменты электростанции на вечной мерзлоте (опыт проектирования, возведения и эксплуатации Якутской центральной электростанции по принципу сохранения вечной мерзлоты). Москва-Ленинград: Изд-во АН СССР, 1947. 104 с.

УПРАВЛЕНИЕ ТЕПЛОВЫМ РЕЖИМОМ РУДНОГО ШТАБЕЛЯ ПРИ КУЧНОМ ВЫЩЕЛАЧИВАНИИ ЗОЛОТА В УСЛОВИЯХ КРИОЛИТОЗОНЫ

Каймонов М. В.

Институт горного дела Севера им. Н. В. Черского СО РАН
г. Якутск, Россия

Аннотация. Рассматриваются вопросы продления периода кучного выщелачивания золота в зоне распространения многолетней мерзлоты. Предложены новые, защищенные патентами РФ, способы конструктивных и объёмно-планировочных решений, способствующих поддержанию оптимальной температуры выщелачивания в массиве рудного штабеля. Разработана математическая модель и проведены многовариантные расчёты по прогнозу теплового режима рудного штабеля в процессе выщелачивания золота в различные периоды года. Предложены новые пути интенсификации процесса выщелачивания в холодном климате.

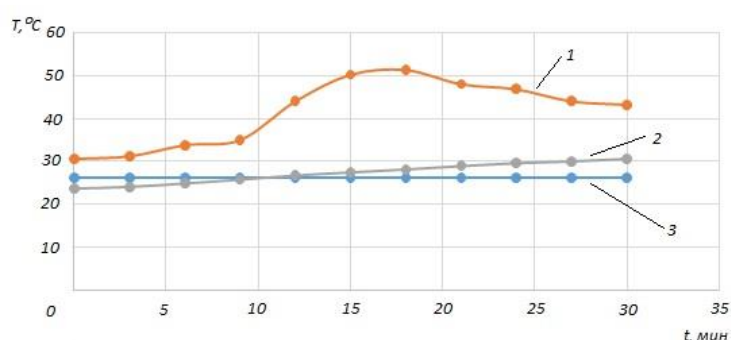
Abstract. The issues of extending the period of heap leaching of gold in the permafrost zone are considered. New, protected by patents of the Russian Federation, methods of constructive and volumetric-planning solutions that contribute to maintaining the optimal leaching temperature in the massif of the ore pile have been proposed. A mathematical model has been developed and multivariate calculations have been carried out to predict the thermal regime of an ore pile in the process of gold leaching in different periods of the year. New ways of intensifying the leaching process in cold climates are proposed.

Характерной чертой развития производства драгоценных металлов в настоящее время является «продвижение» предприятий кучного выщелачивания в восточные и северные регионы Российской Федерации в зоны всё более сурового климата. Широкое внедрение технологии кучного выщелачивания на российских месторождениях осложняется суровыми климатическими условиями. Простой перенос «типовых» решений, принятых в ведущих золотодобывающих странах, на российскую почву показал их недостаточную эффективность, а в ряде случаев и полную непригодность [1–5].

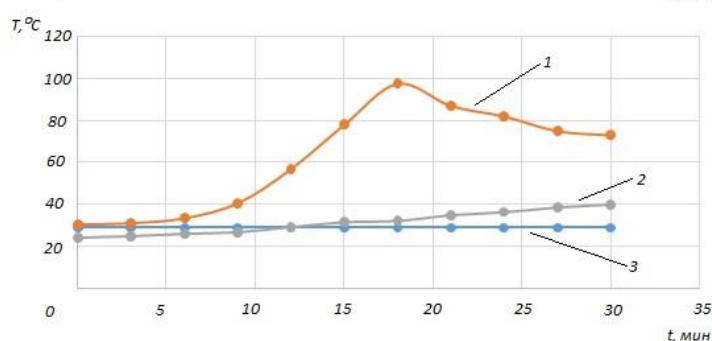
Для продвижения технологий КВ в районы Крайнего Севера необходимо решить вопросы продления периода промсезона, что требует разработки новых и коренного усовершенствования существующих технологий управления тепловым режимом рудного штабеля для активизации процесса выщелачивания. Для этого необходимо разработать новую комплексную математическую модель процессов тепломассопереноса при кучном выщелачивании полезных ископаемых в условиях Крайнего Севера, которая позволит с высокой степенью надёжности оценить ряд важных характеристик КВ золота в зонах многолетней мерзлоты и продлить период выщелачивания [6,7].

На основе анализа имеющихся технических решений предложены новые способы выщелачивания золота в условиях криолитозоны [8–10].

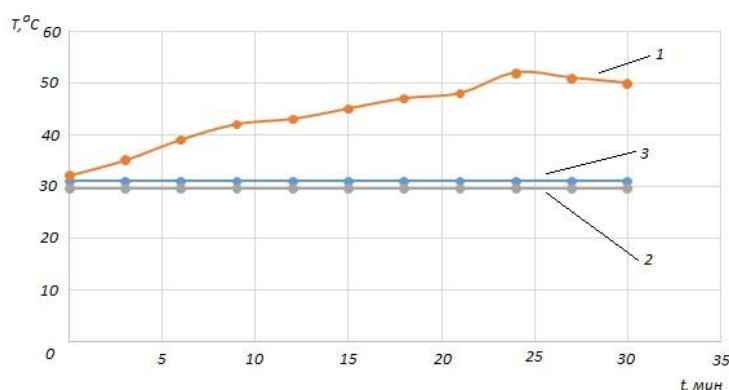
Для уточнения параметров предложенных технических решений и математической модели проведены лабораторные эксперименты по оценке теплоты выделения и скорости протекания реакции гашения извести в породном массиве при естественной ненасыщенной фильтрации жидкости. Результаты проведения экспериментов представлены на рис. 1.



а) негашёная известь фракции 20 мм.



б) негашёная известь фракции 4-5 мм.



в) смесь негашёной извести фракции 2 мм и песок речной в пропорции 50:50.

Рис. 1. Графики температур 1 – негашёной извести; 2 – фильтрующей жидкости; 3 – воздуха

Литература

1. Игнатов А. А. Физико-химические процессы горного производства (математические модели выщелачивания руд и оттаивания мёрзлых пород). – М.: Наука, 1986. – 96 с.
2. Хабиров В. В., Забельский В. К., Воробьёв А. Е. Прогрессивные технологии добычи и переработки золотосодержащего сырья. – М.: Недра, 1994. – 268 с.

3. Татауров С. Б. Трансформация и переработка золотосодержащего сырья в криолитозоне. – М.: Изд-во "Горная книга", 2008. – 319 с.
4. Татаринцев С.М., Хомутов А. В., Косяков О.В., Седых В.И. Применение кучного выщелачивания золота в условиях Крайнего Севера // Цветные металлы. – 2010. – № 11. – С. 44-45.
5. Ковалёв В.Н., Муслимов Б.А., Клепиков А. С. Математическое моделирование кучного выщелачивания золота в зонах многолетней мерзлоты // Горный журнал. – 2013. – № 7. – С. 37-40.
6. Попов В.И., Каймонов М. В. Определение оптимальных параметров процесса выщелачивания в рудном штабеле при отрицательных температурах окружающей среды // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2017. – № 11 (специальный выпуск 24). – С. 292-298.
7. Курилко А. С., Попов В.И. Моделирование тепломассообменных процессов выщелачивания в рудном штабеле при низких температурах окружающей среды // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2021. – № 1. – С. 111-119.
8. Киселев В. В., Каймонов М. В., Попов В.И. Перспективные направления подземного выщелачивания золота в россыпных шахтах криолитозоны // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2018. – № 12. – С. 177-184.
9. Киселев В. В., Каймонов М. В., Попов В.И. Экогетехнологический способ вторичной подземной обработки остаточно-целиковых глубокопогребенных золотороссыпных месторождений криолитозоны // Патент на изобретение РФ № 2678277 С1, 24.01.2019. Заявка № 2017130075 от 24.08.2017.
10. Каймонов М. В., Киселев В. В., Попов В.И. Способ кучного выщелачивания золота из бедных руд в условиях криолитозоны // Патент на изобретение РФ № 2728047 С1, 28.07.2020. Заявка № 2019120495 от 28.06.2019.

ОЦЕНКА УСТОЙЧИВОСТИ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ ГОРНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ В УСЛОВИЯХ КРИОЛИТОЗОНЫ

Каймонов М. В.

Институт горного дела Севера им. Н. В. Черского СО РАН

г. Якутск, Россия

Аннотация. Обоснована необходимость предварительной оценки интенсивности тепловых процессов происходящих в мерзлых грунтах с включениями погребенных льдов при проектировании сооружений поверхностного комплекса карьеров криолитозоны. Подчеркивается, что особое внимание должно быть уделено объектам оказывающим растепляющий эффект, в частности, прудам-отстойникам предназначенным для очистки карьерных и подотвальных вод в летний период эксплуатации. В целях оценки возможности размещения и последующего строительства таких сооружений на площадках сложенных высокольдистыми грунтами, а так же рациональных режимов их эксплуатации были проведены многовариантные численные эксперименты на разработанной математической модели. Приведены результаты исследований, подтверждающие возможность размещения и строительства прудов-отстойников на площадках с наличием линз льда в донной части при условии сезонной (только в зимний период) эксплуатации. Разработаны требования по рациональной эксплуатации прудов-отстойников, соблюдение которых обеспечивает долговременную устойчивость и безаварийное функционирование всех сооружений очистного комплекса в летний период в условиях криолитозоны.

Abstract. The necessity of a preliminary assessment of the intensity of thermal processes occurring in frozen soils with inclusions of buried ice in the design of structures of the surface complex of open-pit mines in the permafrost zone has been substantiated. It is emphasized that special attention should be paid to objects that have a warming effect, in particular, settling ponds intended for the purification of quarry and dump waters in the summer period of operation. In order to assess the possibility of placing and subsequent construction of such structures on sites built up with high ice soils, as well as rational modes of their operation, multivariate numerical experiments were carried out on the developed mathematical model. The results of studies are presented that confirm the possibility of placing and constructing settling ponds on sites with ice lenses in the bottom, subject to seasonal (only in

winter) operation. Requirements for the rational operation of settling ponds have been developed, the observance of which ensures long-term stability and trouble-free operation of all facilities of the treatment complex in the summer in permafrost conditions.

Освоение недр Северо-Восточных регионов РФ со сложными инженерно-геологическими условиями требует особых подходов для обеспечения надежности функционирования строящихся горных предприятий-рудников, шахт, карьеров, а так же сооружений поверхностных комплексов, которые порой приходится возводить на площадках условно пригодных для строительства, в частности, на косогорах и сложенных высокольдистыми грунтами. При этом необходимым условием их качественного проектирования, обеспечения долговременной устойчивости и последующей безаварийной эксплуатации, является включение в состав проектов разделов по теплотехническому расчету и математическому моделированию процессов теплообмена происходящих в основаниях сооружений и вмещающем мерзлом горном массиве [1-3].

Цель прогнозных теплотехнических расчетов – выявить динамику температурного поля каждой дамбы, ее основания и прилегающего пруда-отстойника в период его эксплуатации вплоть до наступления стационарного установившегося режима, как основы статической и фильтрационной устойчивости сооружения.

Задача может быть сформулирована следующим образом. Вокруг пруда-отстойника возведены ограждающие дамбы из скального грунта крупностью 20÷200 мм определенных геометрических размеров. Начальное распределение температуры, влажности в теле, основании дамбы и пруда-отстойника, а также физико-механические и теплофизические свойства используемых грунтов известны (приведены в проекте).

В теле и основании возведенной дамбы и на дне пруда отстойника под влиянием теплообмена с атмосферным воздухом (гребень, правый и левый откосы), а так же с водой (постоянно или периодически покрываемая водой поверхность откосов дамбы и дно пруда-отстойника) и грунтами основания происходит формирование определенного температурного режима. В основании дамбы и на дне пруда-отстойника естественный температурный режим грунтов изменяется в соответствии с новыми условиями теплообмена.

При разработке математической модели исследуемого процесса приняты следующие упрощающие допущения:

✓ Теплообмен на поверхности дамбы (гребень, правый и левый откосы) и массива горных пород с атмосферным воздухом определяется по закону Ньютона с коэффициентом теплообмена α .

✓ Результирующую лучистого теплообмена (солнечную радиацию) контактного слоя определяем по формуле радиационного баланса земной поверхности (Q_R) [4].

✓ Фильтрация воды в теле дамбы и ее основании отсутствует.

✓ За время эксплуатации дамбы ее геометрические размеры, а так же физические и теплофизические свойства грунтов не изменяются.

В соответствии с принятыми расчетной схемой и упрощающими допущениями, расчет двумерного температурного поля дамбы, ее основания и дна пруда-отстойника при нестационарном тепловом режиме сводится к решению системы дифференциальных нелинейных уравнений теории теплопроводности [5]:

$$[C(T, x, y) + L_1 W(x, y) \rho \delta (T - T^*)] \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda(T, x, y) \frac{\partial T}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\lambda(T, x, y) \frac{\partial T}{\partial y} \right];$$

$$C(T, x, y) = \begin{cases} c_1(x, y) \rho_1(x, y), & T < T^*; \\ c_2(x, y) \rho_2(x, y), & T > T^*; \end{cases} \quad \lambda(T, x, y) = \begin{cases} \lambda_1(x, y), & T < T^*; \\ \lambda_2(x, y), & T > T^*; \end{cases}$$

$$x, y \in D_{xy}, \quad t > 0,$$

где T — температура породы, °C; T^* — температура фазовых переходов влаги в породе, °C; t, x, y — временная (с) и пространственные координаты (м); L_1 — скрытая

теплота плавления (замерзания) льда (воды), Дж/кг; W — влажность породы, доли единицы; ρ — плотность воды, кг/м³; c_1, ρ_1, λ_1 (c_2, ρ_2, λ_2) — удельная теплоемкость (Дж/(кг·К)), плотность (кг/м³) и коэффициент теплопроводности (Вт/(м·К)) соответственно для мерзлых (талых) пород; $\delta(T - T^*)$ — функция Дирака.

На рис. 1 представлены изолинии температур в теле дамбы, ее основании и под дном пруда-отстойника на 1 октября в случае, когда полигон пруда-отстойника все лето простоял «сухим». Как видно из рис. 1 в течение летнего периода в основании дамбы сохраняется отрицательные температуры горных пород. Со стороны полигона пруда-отстойника происходит значительная оттайка грунтов дна и откоса дамбы. Так же происходит оттайка погребенного льда на мощность более 0,5 м.

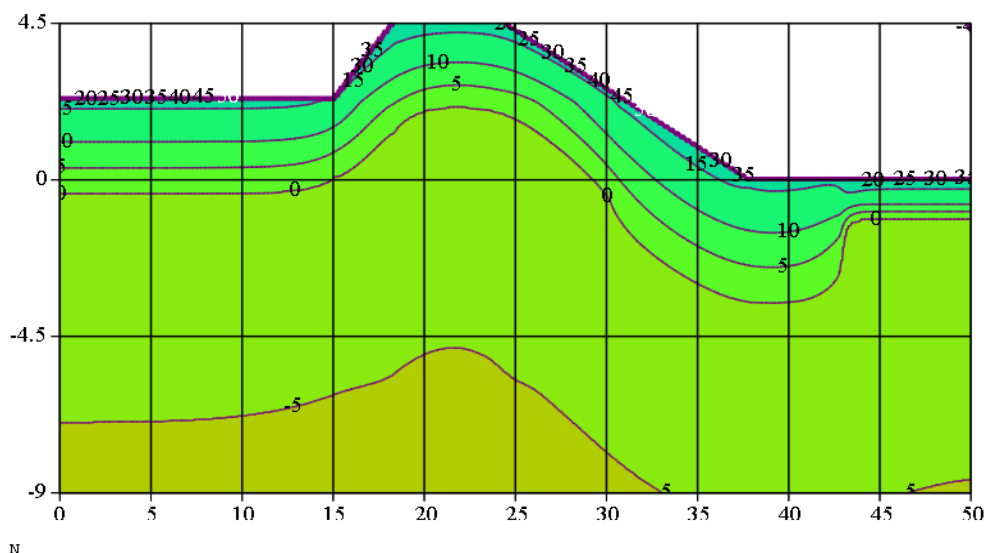


Рис. 1. Изолинии температур в теле дамбы, ее основании и под дном пруда-отстойника на 1 октября в случае, когда полигон пруда-отстойника все лето простоял «сухим»

Таким образом, результаты проведенных численных экспериментов позволяют сделать заключение, что с теплофизических позиций строительство ПО на мерзлых четвертичных грунтах с наличием погребенных льдов возможна при соблюдении нижеперечисленных условий и требований: сезонной (только в летний период) эксплуатации ПО; полного опорожнения обеих секций перед наступлением заморозков; обязательного наполнения обеих секций очищаемой водой в летний период на глубину не менее 1 метра; периодической уборки снега из ПО и ограждающих дамб [6].

Тем самым будет обеспечена долговременная устойчивость ограждающих насыпных сооружений и нормальное функционирование очистного комплекса.

Литература

1. Биянов Г.Ф. Платины на вечной мерзлоте. — М.: Энергоатомиздат, 1983. — 176 с.
2. Чжан Р.В. Температурный режим и устойчивость низконапорных гидроузлов и грунтовых каналов в криолитозоне. — Якутск: Изд-во ИМЗ СО РАН, 2002. — 208 с.
3. Демченко Т.В., Кривоногова Н.Ф., Кривошеков В.С., Щербаносов В.Н. Гидроузлы Чукотки: инженерно-геокриологические условия. — Магадан: ЧФ СВКНИИ ДВО РАН, 2005. — 112 с.
4. Павлов А. В. Энергообмен в ландшафтной сфере Земли. — Новосибирск: Наука, 1984. — 256 с.
5. Курилко А. С., Ермаков С.А., Хохолов Ю.А., Каймонов М. В., Бураков А. М. Моделирование тепловых процессов в горном массиве при открытой разработке россыпей криолитозоны. — Новосибирск: Академическое изд-во «Гео», 2011. — 140 с.
6. Каймонов М. В., Киселёв В. В., Курилко А. С., Краюшкин С.А. Теплофизические аспекты строительства и эксплуатации полууглублённых прудов-отстойников карьеров криолитозоны // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). — 2016. — № S21. — С. 409-417.

БИОПЛАТО ДЛЯ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД В МАЛЫХ НАСЕЛЕННЫХ ПУНКТАХ

Капитонова В. С.¹, Константинова Т. И.¹, Пермяков П. П.^{1, 2}

¹ Северо-Восточный федеральный университет
Якутск, Россия

² Институт физико-технических проблем Севера СО РАН
г. Якутск, Россия
e-mail: vierakap@mail.ru

За последние годы в малых населенных пунктах значительно увеличилось количество водопользователей, что привело к глобальной проблеме утилизации и очистки сточных вод в сельской местности (в малых городах и поселках городского типа), в такой же ситуации находятся улусные центры Центральной Якутии.

Сооружения очистки сточных вод могут быть условно разделены на два вида. К первому виду относятся сооружения, в которых процесс биологической очистки протекает в условиях близких к естественным (биопруды (биоплато), поля фильтрации). В сооружениях второго вида аналогичная очистка осуществляется в искусственно созданных сооружениях: аэротенках, биофильтрах.

Естественная биологическая очистка подразумевает комплекс инженерных мероприятий, которые стараются обеспечить экологические нормы и параметры в области современной охраны окружающей среды.

Биоплато представляет собой искусственно созданные очистные системы, схожие с биопрудами, которые построены согласно оптимальным факторам процесса очистки. Для очистки стоковых вод здесь применяют высшие растения, водоросли и микроорганизмы, через протекание которых происходят процесс фильтрации, осаждения, поглощения и адсорбции. Водные растения в водоемах выполняют следующие основные функции: фильтрационные (способствуют оседанию взвешенных веществ); поглощательные; накопительные; окислительные; детоксикационные (растения способны накапливать токсичные вещества и преобразовывать их в нетоксичные).

Биологические пруды могут применяться как самостоятельные сооружения биологической очистки, или для глубокой очистки сточных вод после сооружений биологической очистки. Биологические пруды бывают с естественной и искусственной аэрацией, контактные, проточные, серийные (состоящие из каскада прудов).

Биологические пруды представляют собой мелкие котлованы глубиной от 0,5–1 м при естественной аэрации и до 3–4,5 м (в зависимости от характеристики аэрирующих устройств) при искусственной. Располагают их на слабодреннирующих грунтах (суглинках, супесях и глинах).

По некоторым данным, экономически эффективны биопруды для обслуживания населенных мест числом жителей до 30 000 с пропускной способностью 100 000–300 000 м³/год.

Биологические пруды с естественной аэрацией состоят из каскада 2–3 прудов (рис.1). Они похожи на естественный «заболоченный» участок, то есть сточные массы поступают на поверхность самого сооружения. К достоинствам данного типа относят удобство в управлении, довольно низкие энергетические и экономические затраты. Среди недостатков – относительно невысокая эффективность очистки, низкая гидравлическая нагрузка и потребность в крупных площадях. Способность поступления в систему кислорода ограничена. Эффективность очистки в сооружениях данного типа претерпевает изменения под влиянием климата.

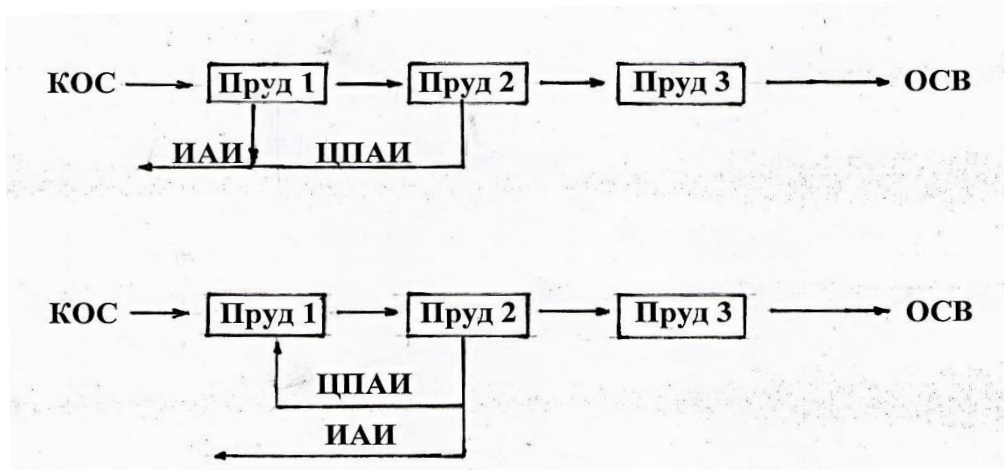


Рис. 1. Технологические схемы работы биопрудов:
 КОС канализационное очистное сооружение; Пруд – биологический пруд;
 ЦПАИ – циркуляционный прудовый активный ил;
 ИАИ – избыточный активный ил; ОСВ – доочищенная в прудах вода

Первая схема предполагает ила в пруду 15–20 мг/л и, следовательно, не может быть признана целесообразной для искусственной аэрации. Искусственная аэрация при такой дозе ила экономически нецелесообразна.

Вторая схема предусматривает автономную рециркуляции ила для его адаптации с условиям пруда, что позволяет не только радикально повысить рабочую дозу ила в пруду, но и создать биоценоз прудового ила максимально приспособленный для окисления поступающих в пруд остаточных загрязнений, подверженных биологическому разложению. Такая схема может обеспечить необходимую глубину доочистки сточных вод в условиях короткого летнего периода при минимальной затрате электроэнергии.

Подбор растений является важной составляющей для очистки сточных вод с использованием биоплато. Виды растений должны подбираться индивидуально, исходя из задач, поставленных перед конкретными очистными сооружениями, учитывая такие факторы, как температура сточных вод, температура окружающей среды, кислотность сточных вод, уровень освещенности и т. д. Растения должны обеспечивать очистку сточных вод до нормативных требований по ряду показателей, а также оставаться жизнеспособными в условиях агрессивности сточных вод и климатических условий.

В условиях многолетней мерзлоты можно использовать для очистки сточных вод малых населенных пунктах Якутии. В таких условиях наиболее значимым фактором является холодный климат, температура воздуха держится ниже нуля градусов на протяжении 9 месяцев, что сильно затрудняет жизнедеятельность растений и их способность накапливать загрязнения. Существует ряд исследований, в которых высшая водная растительность используется для очистки сточных вод в холодных климатических условиях, способствуя решению проблемы и обеспечивая круглогодичную очистку сточных вод.

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ СНЕЖНОГО ПОКРОВА НА ТЕМПЕРАТУРНЫЙ РЕЖИМ ПОРОД ЭЛЬКОНСКОГО ГОРСТА

Кириллин А. Р.

Институт мерзлотоведения им. П. И. Мельникова СО РАН
 г. Якутск, Россия

Аннотация. Исследования снежного покрова проводились в пределах Эльконского горста. Этот район расположен в Южной Якутии и в ландшафтно-климатическом отношении представляет собой часть среднегорной мерзлотно-таёжной области боре-

ального пояса Восточной Сибири. Авторами в период 2014–2020 г.г. проводились режимные наблюдения за особенностями снегонакопления на участке Эльконского горста. В результате полученных исследований установлено, что максимальная мощность снежного покрова в зависимости от геоморфологических условий в пределах рассматриваемой территории изменяется от 0,68 до 1,43 см, а плотность при этом меняется от 140 до 482 кг/м³. Основываясь на натурные данные дана оценка влияния снежного покрова на температурный режим пород.

Abstract. Snow cover studies were carried out within the Elkon Horst. This region is located in South Yakutia and in the landscape-climatic relation is a part of the mid-mountain permafrost-taiga region of the boreal belt of Eastern Siberia. Authors in the period 2014-2020 regime observations were made of the snow accumulation features on the site of the Elkonsky horst. As a result of the studies, it was found that the maximum height of the snow cover, depending on geomorphological conditions within the territory under consideration, varies from 0.68 to 1.3 cm, while the density varies from 140 to 482 kg / m³. Based on field data, an assessment of the effect of snow cover on the temperature regime of rocks is given.

Термическое состояние приповерхностных горных пород определяется в первую очередь воздействием гидрометеорологических факторов, а также их сезонной, годовой и многолетней изменчивостью.

В районах развития многолетнемерзлых пород превалирует влияние зимних гидрометеорологических факторов [1]. Из них важнейшим является образование снежного покрова, свойства которого сильно меняются в пространстве и времени.

При исследовании толщины и плотности снежного покрова проведены маршрутные снегосъёмки на ключевых участках. Эти участки приведены в виде профилей, отображающих ландшафтное разнообразие изучаемой территории. Всего было пройдено 4 профиля состоящий из 34 точек, где проводились измерения. Полевые снегомерные съёмки на объекте исследований выполняются с 2014 года по настоящее время в период максимального накопления

Для оценки влияния снежного покрова на температурный режим пород использовались методы математического моделирования с использованием программного обеспечения Frost 3D Universal.

На теплозащитные (теплоизоляционные) свойства снега оказывают влияние его физические и теплофизические свойства. В расчётах использованы эффективные значения теплопроводности снега, рассчитанные по зависимости Н. И. Шендера [2], которые с увеличением его мощности значительно не изменяются, лишь в период таяния снега резко возрастают за счёт сильного уплотнения. По результатам натурных данных на рассматриваемой территории выпадает значительное количество зимних осадков, так максимальная мощность снежного покрова в зависимости от геоморфологических условий изменяется от 0,68 до 1,43 см, а плотность при этом меняется от 140 до 482 кг/м³.

По результатам расчетов при сохранении нынешних условий или увеличении зимних осадков в течение 30 лет будет наблюдаться повышение температур пород, только при условии уменьшения снежного покрова ниже 60 см может ожидаться понижение (рис. 1).

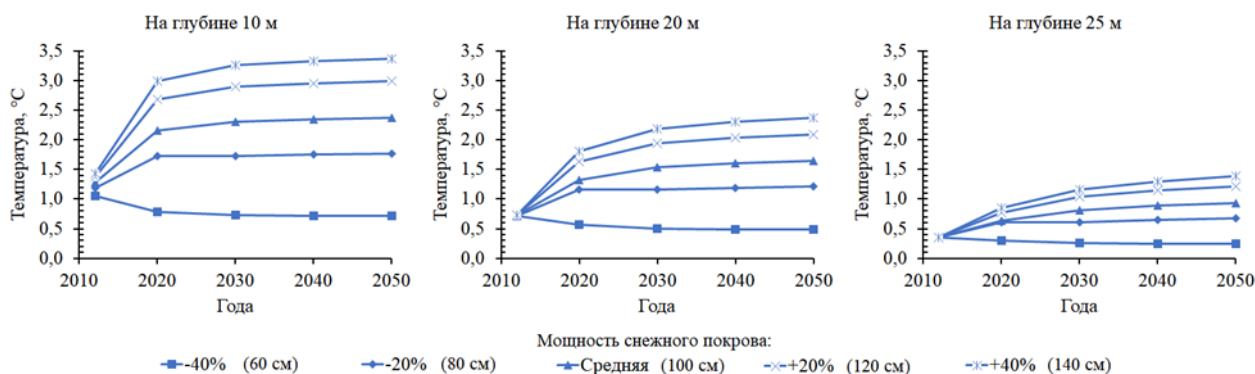


Рис. 1. Изменение температуры пород в период 2012–2050 г.г.

Работа выполнена при поддержке Гранта РФФИ № 20-55-53036 ГФЕН_а.

Литература

1. Павлов А. В. Мониторинг криолитозоны / А. В. Павлов. – Новосибирск: Академ. изд-во “Гео”, 2008 – 229 с.
2. Шендер Н. И. Рекомендации по прогнозу температурного режима грунтов. – Якутск: Изд-во Ин-та мерзлотоведения СО АН СССР, 1986 – 57 с.

МОЩНОСТЬ КРИОЛИТОЗОНЫ НА ЛЕНА-АЛДАНСКОМ МЕЖДУРЕЧЬЕ (ЧУРАПЧИНСКИЙ УЛУС)

Кириллин А. Р.

Институт мерзлотоведения им. П. И. Мельникова СО РАН
г. Якутск, Россия

Аннотация. Впервые для региона приводятся данные о температуре горных пород по скважинам с восстановившимся тепловым режимом до глубины 650 м. Определены глубины залегания нижней границы многолетнемерзлых толщ (ММТ), определены причины различия мощности криолитозоны на относительно не далеко удалённых площадях.

Abstract. For the first time for the region, data are given for the temperature of rocks in the section of the strata along the boreholes with the restored thermal regime to a depth of 650 m. An analysis was made of the thickness of the lower boundary of permafrost and the rock temperature along the section, and the reasons for the difference in the depth of the permafrost zone in relatively remote areas were determined.

Температурные измерения в скважинах проводились точечно установками на базе полупроводниковых терморезисторов. В ходе бурения нарушение теплового поля пород на рассматриваемой территории сопровождается последующим восстановлением их естественной температуры. Особенно долго восстанавливается температура мерзлых толщ. Даже через 4–5 месяцев после окончания бурения температурные кривые буровых скважин (термограммы) отличались наличием безградиентных зон.

Впервые для региона, в пределах Якутского поднятия на его восточном крыле в области сочленения Усть-Алданской впадины и Алданской антеклизы получены геотермические данные до глубины 650 м. Изменение температуры пород с глубиной показывает нестационарный режим мерзлой толщи с областью отрицательного геотермического градиента до глубины 300 м. Геотермическими измерениями установлена аномальная для территории мощность криолитозоны, которая оценивается в 750 м.

Исследования показали, что положение подошвы ММТ обусловлено не столько сменой состава на границе юрских и кембрийских отложений, сколько иными причинами, связанными с наличием и циркуляцией подземных вод в трещиноватых породах, образовавшихся в процессе изменения геолого-тектонической и палеогеографической ситуаций. Существенное влияние на гидро-геотермические условия здесь оказало формирование зоны криогенной дезинтеграции, параметры и глубины которой на этом участке чехла Сибирского кратона зависят от геологического строения осадочных толщ и глубины залегания кристаллического фундамента в период их промерзания.

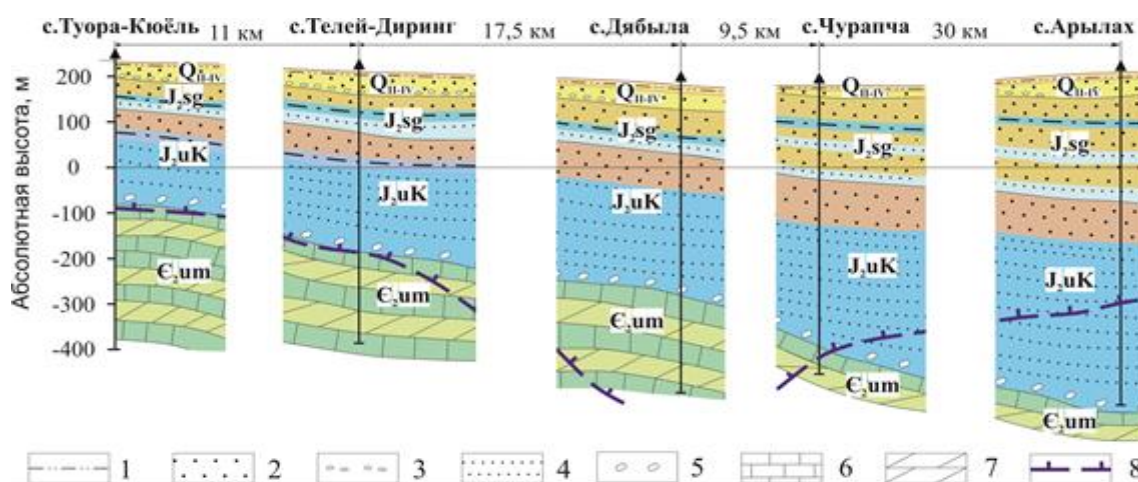


Рис. 1. Схематический геологический разрез по серии скважин с контуром подошвы мерзлых пород: 1 – супеси и торф, 2 – мелко и среднезернистые пески, 3 – включения гальки, 4 – крупнозернистые песчаники, 5 – конгломераты, 6 – известняки, 7 – доломиты, 8 – подошва толщ с отрицательными температурами

ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ И НОВЫЕ РАЗРАБОТКИ СИСТЕМ МОНИТОРИНГА ТЕМПЕРАТУРЫ ВЕЧНОМЕРЗЛЫХ ГРУНТОВ ПРОИЗВОДСТВА АО «НПП «ЭТАЛОН»

Ерёмин И. И., Кропачев Д. Ю., Пугач В. Н.
АО «Научно-производственное предприятие «Эталон»,
г. Омск, Россия

Аннотация. Для безопасности функционирования объектов транспортной инфраструктуры и нефтегазового комплекса в северных районах России предложено осуществлять температурный мониторинг объектов с целью выявления и устранения аварийных ситуаций в районах вечномёрзлого грунта с помощью различных систем мониторинга температур.

Разработанные системы мониторинга предназначены для полевого определения температуры грунтов по ГОСТ 25358-2012, где требуется получить данные о температурном состоянии грунтов.

Abstract. It has been offered to carry out temperature monitoring of facilities for the purposes of detecting and eliminating emergency situations in the areas of permafrost soil with the help of various temperature monitoring systems for operation security of transport infrastructure and oil and gas complex facilities in northern districts of Russia.

Developed monitoring systems are designed for field test of soil temperature where it is required to obtain data on the thermal state of soils.

Архитектура разработанных измерительных систем очень гибкая и позволяет в зависимости от поставленной задачи осуществлять оперативный, автономный или непрерывный мониторинг температуры грунта под основаниями зданий и сооружений,

вдоль земляного полотна железных дорог, тем самым обеспечивая работоспособность и безопасность функционирования объектов в условиях вечной мерзлоты.

Для проведения оперативных замеров используется комплект оборудования, состоящий из контроллера ПКЦД-1/100 и термокося МЦДТ 0922. ПКЦД-1/100 позволяет устойчиво считывать показания термокося с интервалом опроса от 10 секунд до 1 часа, а также сохранять информацию об измеренной температуре каждого датчика в термокося в энергонезависимой памяти прибора.

Для проведения автономных замеров температурных полей удаленных и труднодоступных объектов (термометрических скважин) используется комплект оборудования, состоящий из логгеров ЛЦД-1/100-СД и термокося МЦДТ 0922 или МЦДТ 1201. Логгер совместно с термокося размещается в термометрической скважине ниже уровня земли и работает автономно в течение нескольких лет.

Для решения задач непрерывного мониторинга температуры и оповещения об ее критических изменениях под зданиями и сооружениями, рекомендуется использовать систему СТМ ПО, представляющую собой совокупность контроллеров СКЦД-6/200 с использованием линии связи RS-485, и термокося МЦДТ 0922 и (или) МЦДТ 1201.

Для решения задач по автономному мониторингу и передаче данных по беспроводной линии связи используется вариант на базе логгеров ЛЦД-1/100-РМ. В октябре 2012 г. совместно со специалистами Мерзлотной станции Центра ИССО АО РЖД в скважины установлены логгеры ЛЦД-1/100-СД и термокося МЦДТ 0922 на объекте земляного полотна «Км 2339» перегона Курьян-Тында.

Анализ работы системы показал высокую точность и надежность приборов, получена качественно новая информация о температурном режиме объекта земляного полотна. По результатам температурного мониторинга были выполнены определенные практические мероприятия по предотвращению деформаций насыпи.

В мае 2014 г. установлены в опытную эксплуатацию логгеры ЛЦД-1/100-РМ, позволяющие уже без извлечения самих логгеров из скважин получать информацию о температурных режимах грунтов по беспроводной связи. Устойчивая работа по передаче данных с логгеров на ноутбук с помощью радиомодема (дальность связи) осуществлялась на расстоянии 1500 метров.

Аналогичная система температурного мониторинга установлена на поворотном круге станции Обская ООО «ГазпромТранс», г. Лабытнанги в октябре 2014 г.

Начиная с 2014 года, специалистами службы геотехнического мониторинга инженерно-технического центра ООО «Газпром добыча Надым» применяется термометрическое оборудование производства АО «НПП «Эталон» в составе термокося МЦДТ 0922, логгеров ЛЦД-1/100 РМ, а также контроллеров портативных ПКЦД – 1/100 для контроля температуры грунтов оснований объектов газопромышленной инфраструктуры.

В развитие вышеперечисленных систем разработана «Система удаленного сбора данных», позволяющая объединить радио канальные стационарный и автономный варианты в единую систему с автоматизированным сбором данных и хранением на централизованном сервере. Доступ к данным осуществляется с любого автоматизированного рабочего места (АРМ) по зашифрованному каналу, включенного в одну сеть с сервером через ПО «ГеоМет». Конфигурация системы приведена на рис.1.

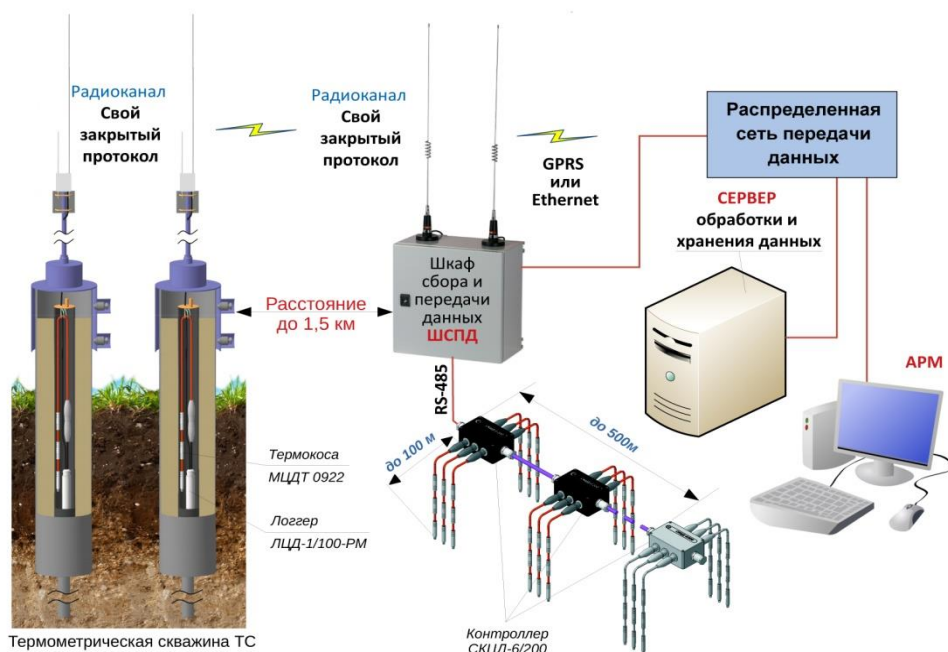


Рис. 1. Конфигурация системы температурного мониторинга

Заключение

1. Системы мониторинга температуры и тепловых потоков являются необходимыми составляющими как для эксплуатируемых объектов, так и для проведения новых изысканий в области строительства и стабилизации вечномёрзлых грунтов.
2. Разрабатываемая система позволяет удаленно производить сбор данных с систем температурного мониторинга грунтов, без необходимости выезжать на объект, что значительно повышает эффективность работы с системами температурного мониторинга грунта.

Литература

1. Корниенко С. Г. Изучение и мониторинг мерзлых грунтов с использованием данных космической съемки // Материалы 11-й Всероссийской научно-практической конференции «Геоинформатика в нефтегазовой отрасли».
2. Минкин Марк Строительство нефтегазовых объектов на Севере // Материалы семинара «Вопросы проектирования фундаментов на особых грунтах. Новые геотехнические конструкции и методы их расчетов», 2010.
3. Никоненко В. А., Кропачев Д.Ю., Сиротюк В. В., Иванов Е.В., Мониторинг температуры на транспортных объектах в регионах с сезонно промерзающими и многолетнемерзлыми грунтами / Приборы – Москва: Союз общественных объединений "Международное научно-техническое общество приборостроителей и метеорологов", 2015 – Выпуск 9 (183). – С. 7-13.

РОЛЬ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА В ПРОЦЕССЕ МОРОЗНОГО ВЫВЕТРИВАНИЯ ПОВЕРХНОСТИ ГОРНЫХ ПОРОД

Попов В. И.
Институт горного дела севера им. Н. В. Черского СО РАН
г. Якутск, Россия
popov.gtf@mail.ru

Отслоение тонких чешуек с поверхности горных пород является важным геоморфологическим процессом эрозии, действующим в широком диапазоне типов пород и климатических условий. Основные процессы, которые приводят к отколу и отслоению, изменчивы в зависимости от строения пород и климата. В тоже время, среди наиболее

вероятных причин полагают периодические изменения влагосодержания и температуры в поверхностном слое породы. Для пористых пород, расположенных в умеренных регионах, откол или отслоение чешуек обусловлены механизмами замерзания поровой влаги, кристаллизации и гидратации солей [1,2] или формированием тепловых напряжений. Процессы выветривания вызывают важные изменения в пористости породы. Помимо пористости, распределение размеров пор является существенным для выявление изменений в процессе выветривания горных пород. Отмечено изменение пористости с 0,25% до 0,62%, и почти 50% снижение модуля Юнга. Другие исследования также показали, что параметры материала, особенно геометрия пор и трещин очень важны для оценки поведения процесса выветривания породы. Периодическое замерзание и оттаивание воды в расщелинах горных пород и грунтовых материалах признается важным фактором механического (морозного) выветривания.

Результатами моделирования определено, что влияние знакопеременных температур на поверхность протаивающего массива приводит к формированию предпочтительно одной, но достаточно мощной зоны повышенного льдосодержания на границе с мерзлой частью массива. Схематично эти процессы можно связать с весенним и осенне-зимним сезонами соответственно. Необходимо отметить что процесс весеннего льдонакопления отличается более интенсивным характером.

В первом приближении объем выветривания можно считать пропорциональным глубине проникновения знакопеременных температурных осцилляций. Обнаружение и анализ пространственно упорядоченных расположений ледяных включений позволит оценить размеры областей частичной или полной дезинтеграции.

ВЛИЯНИЕ АНТРОПОГЕННЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА ТЕПЛОЕ СОСТОЯНИЕ ГРУНТОВ ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЯКУТИИ

Скрябин П. Н., Варламов С. П.

Институт мерзлотоведения им. П. И. Мельникова СО РАН
Якутск, Россия

Аннотация. Представлены результаты многолетних геотемпературных исследований на нарушенных ландшафтах в полосе прокладки железной дороги, водовода и газопровода. Проанализированы изменения теплового состояния грунтов при антропогенных воздействиях. Выявлено значительное повышение среднегодовой температуры верхних горизонтов криолитозоны и увеличение глубины сезонного протаивания при вырубке леса и удалении напочвенного покрова, вырубке леса на гарях при межаласном типе местности. Количественно оценена динамика среднегодовой температуры грунтов на разнорежимных рубках леса, а также на гарях в зависимости от стадий сукцессионного развития растительности.

Ключевые слова: мерзлые грунты, нарушенные ландшафты, антропогенное воздействие, температура, глубина протаивания.

ANTHROPOGENIC IMPACTS ON THE THERMAL CONDITION OF PERMAFROST IN CENTRAL YAKUTIA

Skryabin P. N., Varlamov S. P.

Melnikov Permafrost Institute SB RAS
Yakutsk, Russia

Abstract. The results of long-term geothermal investigations in disturbed landscapes along the railway, water line and gas pipeline are presented. Human-induced changes in the ground thermal state are analyzed. The study has shown significant increases in mean annual temperature of the upper permafrost layers, as well as in seasonal thaw depth in the inter-alas type of terrain after the removal of trees, ground surface stripping and post-fire

clearing. Quantitative estimates are given for the dynamics of mean annual ground temperatures on cuts and burns in relation to vegetation succession.

Keywords: frozen ground, disturbed landscapes, human impact, temperature, thawing depth.

Тепловое состояние грунтов является одним из основных факторов определяющих устойчивость природно-технических систем при освоении территории. Исследования проведены методом теплофизики ландшафтов на основе экспериментальных наблюдений.

Оценка эволюции верхних горизонтов криолитозоны при изменении климата и антропогенных воздействий является современной приоритетной проблемой. Институт мерзлотоведения им. П. И. Мельникова СО РАН постоянно уделяет внимание исследованиям температурного режима слоя годовых теплооборотов в нарушенных условиях.

В Центральной Якутии расширяется строительство трубопроводов, железных и автомобильных дорог, линий электропередач, которое неизбежно сопровождается значительными нарушениями природных условий. Антропогенные воздействия различного типа и масштаба (вырубка леса, пожары, удаление напочвенных покровов и т. д.) приводят к изменению геокриологических условий, в том числе температурного режима грунтов, развитию негативных криогенных процессов. Исследования термического режима грунтов, проводимые авторами с 1987 г., позволяют количественно оценить его пространственно-временную изменчивость под влиянием антропогенеза.

Наблюдательная сеть геотемпературного мониторинга различной продолжительности охватывает более 90 пунктов различных антропогенных ландшафтов, в том числе с удаленным напочвенным покровом – 8, на вырубках – 40, на гарях – 23, на гарях с вырубкой – 11, на пашнях – 2, на насыпях – 26 (табл. 6.1). Продолжительность наблюдений на них различная: от одногодичных до 5–10, 15–25 и 30 летних. Наибольшие объемы работ по созданию наблюдательной сети проведены в периоды 1987–1990, 1993–1995 и 2007–2009 гг. при инженерно-геокриологическом сопровождении строительства линейных сооружений.

Экспериментальные исследования позволили количественно оценить влияние различных антропогенных воздействий на температурный режим грунтов в доминирующих ландшафтных условиях. Для выявления влияния антропогенных воздействий на формирование теплового режима грунтов необходимо оценить пределы их изменений, определяемых от воздействия комплекса факторов: геоботанических (вид, густота, развитие растительности), криолитологических (литологическое строение, увлажненность деятельного слоя, льдистость многолетнемерзлых грунтов).

Исследования также позволили количественно оценить пространственно-временную изменчивость термического режима грунтов антропогенных территорий. Динамика термического состояния пород определяется стадиями сукцессионного развития растительного покрова. Оттаивание мерзлых грунтов, увеличение мощности сезонноталого слоя из-за влияния пожаров особенно опасно в межаласном типе местности с близким от поверхности залеганием сильнольдистых отложений, где возможно развитие негативных криогенных процессов и явлений.

Многолетние исследования позволяют сделать следующие выводы:

Удаление теплоизолирующего напочвенного покрова в межгрядово-низинном и межаласном типах местности выявило повышение среднегодовой температуры на глубине 10 м в пределах 1,5–2,0 °C и увеличение глубины сезонного протаивания в 1,4–1,6 раза. Разнорежимные рубки лесов в песчано-грядовом и межаласном типах местности сопровождаются повышением T_0 на 0,2–0,8 °C, увеличением ξ на 0,3–0,6 м. Рубка леса после пожаров в низкотеррасовом, песчано-грядовом и межаласном типах местности приводит к повышению T_0 на 0,3–0,8 °C и увеличению ξ в 1,2–1,6 раза, что ослабляет устойчивость ландшафтов после антропогенного воздействия. Повышение T_0 на

0,2–2,0 °C и увеличение ξ в 0,3–1,5 раза отмечаются в первые 5–7 лет после нарушения природных условий. Самовосстановление растительности на 2–3 стадиях понижает T_0 на 0,5–1,0 °C, сокращает ξ на 0,2–0,3 м. Наибольшее влияние на тепловое состояние грунтов оказывают вырубка леса и удаление напочвенного покрова, вырубка леса на горах в межальпийском типе местности. На альпийских участках нарушения природных условий сопровождается развитием криогенных процессов.

Динамика термического состояния грунтов при антропогенных воздействиях свидетельствует об их относительной устойчивости в песчано-грядовом типе местности. В слабоустойчивых межальпийских ландшафтах при близком залегании подземных льдов начинается развитие негативных криогенных процессов, угрожающих устойчивости линейных сооружений и инфраструктурных объектов.

Результаты исследований можно распространить на однотипные антропогенные ландшафты региона и использовать для моделирования изменения теплового режима грунтов при антропогенных воздействиях.

Многолетние режимные наблюдения за тепловым состоянием грунтов проведены в рамках приоритетных направлений и программ фундаментальных исследований СО РАН.

Работа подготовлена при поддержке гранта РФФИ р_а 18-41-140008.

ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДА ТЕПЛОВОЙ ИНФРАКРАСНОЙ СЪЕМКИ ПРИ ИДЕНТИФИКАЦИИ МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ПОРОД В ГОРНЫХ РАЙОНАХ КРИОЛИТОЗОНЫ

Калиничева С. В.

Институт мерзлотоведения им. П. И. Мельникова СО РАН

Якутск, Россия

Аннотация. Охарактеризован дистанционный геофизический метод – тепловая инфракрасная съемка, воспроизводимая со спутника Landsat. Представлена методика выявления по ней многолетнемерзлых пород и таликов в зоне прерывистой мерзлоты в горных районах Южной Якутии, на примере Эльконского горного массива и Олекмо-Чарского нагорья. Впервые более детально охарактеризованы индикационные свойства радиационной температуры (теплового инфракрасного излучения поверхности ландшафта), получаемого с помощью тепловой инфракрасной съемки Landsat для выявления и регионального картографирования многолетнемерзлых пород и таликов.

Abstract. The article describes the remote geophysical method – thermal infrared imagery reproduced from the Landsat satellite. The method of detecting permafrost and unfrozen ground in the discontinuous permafrost zone in the mountainous regions of South Yakutia is presented, using the example of the Elkon Massif and the Olekma-Chara uplands. For the first time, the indicative properties of the LST (thermal infrared radiation of the landscape surface) obtained using Landsat thermal infrared imagery for the identification and regional mapping of permafrost are characterized in more detail.

В исследованиях многолетнемерзлых пород применяются разные методы, одними из основных которых являются геофизические. К интенсивно развиваемым дистанционным геофизическим методам относится тепловая инфракрасная съемка, осуществляемая с помощью тепловизоров. Данные приборы представляют собой оптико-электронные устройства пассивного типа, позволяющие регистрировать тепловое ИК излучение (8–14 мкм), измерять и преобразовывать его в значения яркости изображения [1].

Тепловизионной съемкой фиксируют собственное тепловое излучение объектов земной поверхности (в отличие от отраженного солнечного излучения, видимого человеческим глазом), что дает возможность качественно оценивать их внутреннее состояние. Инфракрасное излучение невидимо для человеческого глаза, но может быть обнаружено при помощи специальных фотоприемников, оптимизированных под конкретный спектральный диапазон. Важная особенность изображений, полученных в тепловом инфракрасном диапазоне заключается в том, что они регистрируют не температуру объектов, а интенсивность теплового излучения. По зарегистрированному тепловому излучению определяется так называемая *радиационная температура* (РТ), которая обычно ниже физической, поскольку она зависит еще и от излучательной способности объекта, и от ослабления излучения в атмосфере.

С использованием вышеописанного метода теплового дистанционного зондирования были исследованы мерзлотные условия горных районов Южной Якутии – Эльконский горный массив и Олекмо-Чарское нагорье. Исследование этих районов имеет особое значение в виду концентрации в ней различных природных ресурсов и их экономической значимости. В пределах исследуемых территорий рассмотрены приводораздельные и склоновые ландшафты на абсолютных высотах от 700 до 1200 м.

Рассматриваемые территории исследования имеют схожую геолого-географическую среду. Многолетнемерзлые толщи исследуемых территорий характеризуются значительной пространственной неоднородностью. По распространению преобладают прерывистые многолетнемерзлые толщи и залегают преимущественно на крутых склонах северной и западной экспозиций, а также на конусовидных водоразделах гольцов и подгольцовых зон. [2, 3].

Для настоящих исследований были использованы данные о температуре горных пород в 45 скважинах – в Эльконском горсте и 13 скважинах – в Тарыннахском месторождении, пробуренных глубиной от 10 до 500 метров в разных ландшафтных условиях. Помимо данных по температуре пород в исследовании учитывались, также, такие компоненты ландшафта, как рельеф (высота, уклон и экспозиция), растительный и снежный покровы.

Снимки теплового диапазона для исследуемых участков были выбраны посредством анализа из серии снимков. Так, из анализа разновременных тепловых снимков за разные сезоны (месяцы) с натурными полевыми данными выяснилось, что только период со второй половины августа по первую половину сентября радиационная температура поверхности имеет взаимосвязь с температурой пород на подошве годовых теплооборотов. По нашему мнению, это связано с тем обстоятельством, что в указанный период в рассматриваемых горных районах сезонно-талый слой достигает максимальных значений, а сезонно-мерзлый полностью оттаивает. А также, в этот период исключается маскирующее влияние активно вегетирующей растительности и аномальные температурные контрасты за счет солнечного нагрева будут минимальными. Так, для Эльконского горста был выбран снимок, полученный 21 августа 2009 г., для Олекмо-Чарского нагорья снимок от 18 сентября 2009 г. Вычисление значений РТ проходило в два этапа по алгоритму, описанным Chander et al. [4].

Исследование проводилось в несколько этапов. На начальных этапах исследования был проведен сопряженный анализ полевых геотермических данных с ландшафтными факторами и РТ, а также были выявлены корреляционные связи и составлена ландшафтно-криоиндикационная таблица для исследуемых территорий. Так, по выбранному нами снимку (*от 21 августа 2009 г.*), на момент съемки для Эльконского горного массива были получены пределы изменчивости радиационной температуры от 9 до 26°C. Анализ карты РТ совместно с данными полевых мерзлотных исследований показывают, что при прочих равных условиях интенсивность теплового излучения областей развития ММП, как правило, ниже (9–15°C), чем у ландшафтов, развитых на талых породах (16–19°C). Однако, на участках развития каменных развалов, курумов,

радиационная температура в летний период оказывается выше, чем на таликах (17–26°C). Это объясняется тем, что обнаженные горные породы нагреваются сильнее участков с растительностью. В районе Тарыннахского месторождения (Олекмо-Чарское нагорье) сопоставление геотермических данных по скважинам и значений теплового инфракрасного излучения поверхности в исследуемом районе показало, что значения РТ от 8°C и ниже идентифицируют многолетнемерзлые породы, а значением РТ 9–12 °C фиксируются талые породы. РТ 8-9°C отражает породы с переходной температурой (близкой к 0°C). Участки с каменными полями, под которыми развиваются мерзлые породы, как упоминалось выше, фиксируются в разных ландшафтных условиях высокими значениями РТ (9-20°C) из-за интенсивного прогревания их поверхности в теплый сезон года.

Далее, по данной таблице были составлены алгоритмы распознавания ММП и талых пород отдельно для групп экспозиций, сходных по климатическим условиям. На основе вышеприведенных алгоритмов, с применением программ ArcGis 10.1 нами была составлена среднемасштабная мерзлотно-ландшафтная карта Эльконского горного массива и Олекмо-Чарского нагорья.

Литература

1. Криксунов, Л.З. Тепловизоры: справочник / Л.З. Криксунов, Г.А. Падалко. – Киев: Техника, 1987. – 166 с.
2. Железняк М.Н., Дорофеев И.В., Сериков С. И., Осипов Е.А. Геокриологические условия Эльконского горста // Научное обеспечение реализации мегапроектов Республики Саха (Якутия). – Якутск: Компания «Дани Алмас», 2009. – С. 67-72.
3. Железняк М.Н., Жижин В.И., Сериков С. И. Геокриологические условия Олекмо-Чарского поднятия в зоне проектируемых линейных сооружений на участке Икабъекан-Тарыннах // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 6. – С. 1675.
4. Chander G., Markham B.L. Revised Landsat-5 TM Radiometric Calibration Procedures, and Postcalibration Dynamic Ranges / G. Chander, B.L. Markham // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. – 2003. – № 41(11). – P. 2674-2677.

Энергетика

Энергетические системы. Энергоснабжение. Автоматизация и цифровизация энергетической отрасли. Новые технологии и экологические проблемы в энергетике.

ОХЛАЖДЕНИЕ МОЩНОГО СВЕТОДИОДНОГО МОДУЛЯ

Гатапова Е. Я.¹, Sahu G.², Khandekar S.², Hu R.

¹ Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1, gatapova@itp.nsc.ru

² Indian Institute of Technology Kanpur, Kanpur, 208016 India

³ Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, 430074, China

Аннотация. Для мощных светодиодов (LED) следующего поколения требуются специальные системы охлаждения для обеспечения производительности и надежности. Экспериментально и численно исследованы возможности многоструйной однофазной системы жидкостного охлаждения для мощного светодиодного модуля (номинальная мощность 300 Вт). Число Рейнольдса всей струйной системы варьируется в диапазоне $Re = 3833\text{--}46\,119$. Сделан вывод, что однофазное микроструйное охлаждение на основе воды имеет высокий потенциал для управления температурным режимом мощных светодиодов.

Abstract. Next generation high-power Light-Emitting Diodes (LED) require specialized cooling systems for ensuring performance and reliability. The ability of a multi-jet single-phase liquid cooling system for thermal management of the high-power LED based luminaire is investigated (experimentally and numerically) and successfully demonstrated for a 300 W nominal power module. Reynolds number of the jet system is varied in the range $Re = 3833\text{--}46\,119$. It is concluded that single-phase array of water-based jet flow is an excellent potential option for thermal management of high-power LED.

Развитие светодиодной техники, как и других полупроводниковых устройств, находится на пути к увеличению оптической мощности устройств/модулей при уменьшении физических размеров. Естественным следствием этого является соответствующее увеличение тепловыделения, как мощности, так и теплового потока. Время безотказной работы, мощность оптического излучения, цветовая температура и другие характеристики светодиодов тесно связаны с температурой его р-п перехода. Эта сильная связь между производительностью и рабочей температурой делает управление терморегуляцией светодиода одним из наиболее важных элементов общей схемы проектирования данных устройств [1–2].

В данной работе мы экспериментально исследуем охлаждение реального светодиодного модуля с номинальной мощностью 300 Вт (т. е. не имитируемый нагреватель) микроструйной системой с пятью соплами, и показываем рабочие пределы светодиодного модуля [3]. Модуль состоит из 100 отдельных светодиодов, имеющих общую площадь подложки 20 мм × 20 мм. Общий расход потока воды со всех пяти сопел варьировался от 65 до 782 мл/мин (число Рейнольдса от отдельных струй от 766 до 9223).

Показано, что тепловая мощность составляет 60 – 70% от входной электрической мощности во всем рассматриваемом диапазоне. Достигается тепловой поток около 80 Вт/см² при температуре поверхности ниже 65 °С для $Re = 24\,887$, а для $Re = 46\,119$ температура составила 49 °С. При этом входная мощность составляла 490 Вт и 477 Вт, соответственно (Рис. 1а). Коэффициент теплоотдачи составил 10000–20000 Вт/м²К и 13000–31000 Вт/м²К для $Re = 24\,887$ и $Re = 46\,119$, соответственно, согласно экспериментальным данным, при увеличении мощности.

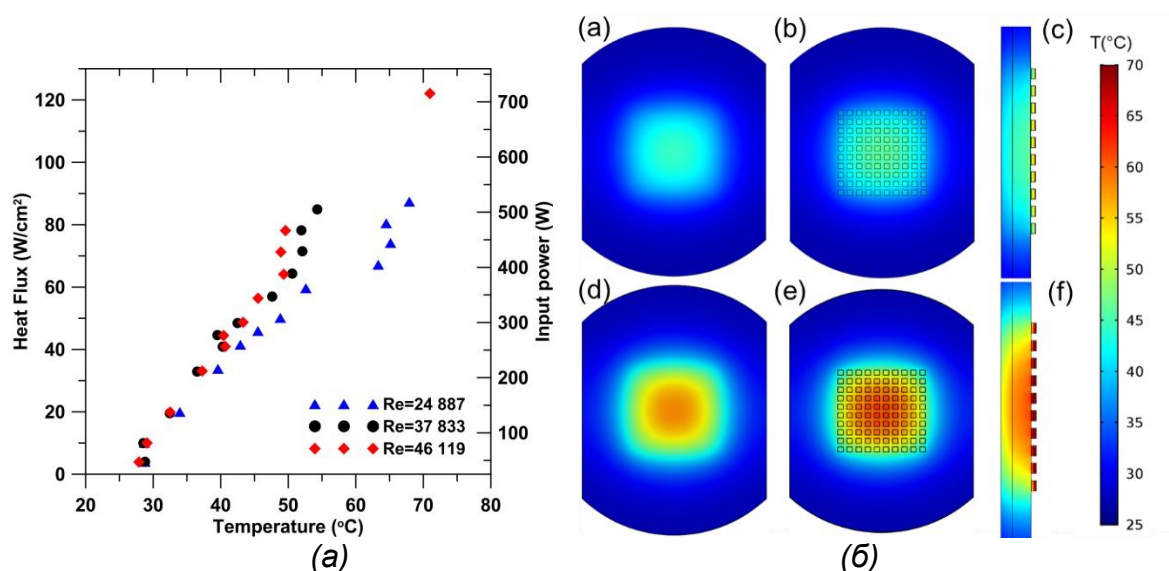


Рис. 1. (а) Зависимость теплового потока и температуры при различных числах Re и (б) Пространственное распределение температуры мощного светодиодного модуля при коэффициенте теплоотдачи $22\ 100\ \text{Вт/м}^2\text{К}$, (а) вид с тыльной (распыляемой струями) стороны, тепловая мощность = 200 Вт, (б) вид со стороны освещения, где переход, 200 Вт, (д) вид с тыльной (распыляемой струями) стороны, 350 Вт, (е) вид со стороны освещения, где переход, 350 Вт, (с) вид в поперечном сечении, 200 Вт, (ф) вид в поперечном сечении, 350 Вт

Для оценки пространственного распределения температуры и теплового потока в различных сечениях светодиодного модуля проводилось численное моделирование с использованием COMSOL Multiphysics® (Рис. 1б), результаты сравниваются с экспериментально полученными данными. Показана существенное увеличение температуры, а также теплового потока вблизи самого чипа.

Исследование выполнено при совместной финансовой поддержке трех стран: Минобрнауки России (Соглашение 14.613.21.0067, идентификатор проекта RFMEFI61317X0067), the Department of Science and Technology, Government of India, under the International Multilateral Regional Cooperation Program (Project #DST/I RDC/BRICS/Pilot Call/HPCSLED/2017 (G)) и the Ministry of Science and Technology of the People's Republic of China (Project No. 2017YFE0100600).

Литература

1. Luo X., Hu R., Liu S., Wang K.. Heat and fluid flow in high-power LED packaging and applications // Prog. Energy Combust. Sci.. – 2016. – 56. – P. 1–32.
2. Khandekar S., Sahu G., Muralidhar K., Gatapova E.Ya., Kabov O.A., Hu R., Luo X., Zhao L.. Cooling of High-Power LEDs by Liquid Sprays: Challenges and Prospects // Applied Thermal Engineering. – 2021. – 184. – 115640.
3. Gatapova E.Ya., Sahu G., Khandekar S., Hu R.. Thermal Management of High-Power LED Module with Single-phase Liquid Jet Array // Applied Thermal Engineering. – 2020. – 184. – 116270.

ОСОБЕННОСТИ ДЕСТРУКЦИИ НЕФТЯНЫХ УГЛЕВОДОРОДОВ В ПОЧВАХ ОБЪЕКТОВ ТОПЛИВНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА ЯКУТИИ

Глянцева Ю. С., Зуева И. Н., Лифшиц С. Х., Чалая О. Н.
Институт проблем нефти и газа СО РАН
Якутск, Россия

Аннотация. В работе представлены данные 8-ми летнего мониторинга за восстановлением нефтезагрязненных земель и оценки эффективности биологической очистки почв. Эффект от очистных работ четко прослеживался ежегодно только в течение одного летнего сезона. Увеличение уровня загрязнения к началу каждого следующего

сезона вероятнее всего связано с миграцией нефти из нижележащих почвенных горизонтов в приповерхностные, что подтверждают данные химического состава проб почв, отобранных с глубины до 100 см. Это могло сгладить положительный эффект рекультивационных работ.

Abstract. The paper presents data from 8-year monitoring of disturbed lands and estimation the effectiveness of measures for biological treatment of oil-contaminated soils. The effect of the clean-up works was clearly observed annually only during the summer season. The increase in the level of pollution by the beginning of each next season is most likely due to the migration of oil from the underlying soil horizons to the near-surface ones, which is confirmed by the data of the chemical composition of the samples. This could shade the positive effect of remediation work.

По данным Министерства экологии, природопользования и лесного хозяйства Республики Саха (Якутия), за последние 12 лет количество разливов нефти и нефтепродуктов составило более 316 случаев [1]. Эксплуатация объектов топливно-энергетического комплекса в условиях криолитозоны может сопровождаться риском возникновения аварийных ситуаций, иногда достигающих масштаба экологических катастроф, таких как одна из крупнейших аварий в 2020 г. в г. Норильск, где произошла утечка более 20 тысяч тонн дизельного топлива [2].

При восстановлении нефтезагрязненных почв используют физические, химические и биологические методы, а также их сочетания [3]. К сожалению, все еще применяются такие методы ликвидации разливов нефти как сжигание, засыпка загрязнённых участков песком, что является не допустимым.

Целью данной работы была оценка качества очистки нефтезагрязненных почв биологическим способом непосредственно на месте разлива без перемещения грунта. Для этого применялся комплекс физико-химических методов анализа: жидкостная экстракция, ИК-Фурье-спектроскопия, жидкостно-адсорбционная колоночная хроматография.

Объектом исследований являлся участок территории с нефтезагрязненной почвой, где в 2010–2012 г.г. проводились экспериментальные работы по биологической рекультивации. Для этого применялся биопрепарат на основе аборигенных углеводородоокисляющих микроорганизмов. Мониторинг данного участка проводился на протяжении 8 лет, для этого пробы почв отбирались в конце мая и в начале сентября каждого года.

В первый год проведения биологической рекультивации через 3,5 месяца после обработки почв биопрепаратом было установлено снижение концентрации нефти в почве, степень деструкции составила 59 %. В последующие годы: 49% в 2011 г. и 54% в 2012 г. За 8 лет мониторинга, было установлено, что ежегодно к началу нового сезона концентрация нефти в почве снова возрастала (рис. 1). Для установления причины ежегодных колебаний уровня загрязнения в 2016 г. на данном участке были отобраны пробы почв с различной глубины (до 100 см). Из таблицы 1 видно, что с глубиной содержание нефти увеличивается, а в составе почвенных экстрактов возрастает количество углеводородных компонентов и уменьшается содержание смол и асфальтенов. Относительные коэффициенты поглощения структурных групп, рассчитанных по результатам ИК-Фурье спектрометрии (D'_{720} – длинные метиленовые группы, D'_{1710} – карбонильные группы) указывают на более нефтяной характер проб с глубины 50–100 см (табл. 1).

Таблица 1

Глубина, см	С _{нп} ,* мг/кг	Групповой состав, %		Спектральные коэффициенты	
		Углеводороды	Смолы+Асфальтены	D' ₇₂₀	D' ₁₇₁₀
10	20990	67,7	32,3	0,108	0,084
30	38810	67,6	32,3	–	–
50	33678	76,0	21,0	0,123	0,047
80	43477	75,7	24,3	0,124	0,050
100	42917	75,2	24,8	0,130	0,043

Литература

- ~ 150 ~

ФИТОРЕМЕДИАЦИЯ НЕФТЕЗАГРЯЗНЕННЫХ ПОЧВ КРИОЛИТОЗОНЫ

Лифшиц С. Х., Чалая О. Н., Глянцева Ю. С., Зуева И. Н.
Институт проблем нефти и газа СО РАН
Якутск, Россия

Аннотация. Для восстановления нефтезагрязненных почв широко используется метод фитореимедиаии. На примере Вики посевной для увеличения эффективности мероприятий по очистке мерзлотных территорий от нефтезагрязнений можно рекомендовать посев семян, которые прошли предварительную обработку путем замачивания в растворах салициловой кислоты концентрации 10^{-3} и 10^{-4} моль/л или гумата.

Abstract. The phytoremediation method is widely used to restore oil-contaminated soils. Using the example of *Vicia sativa*, to increase the efficiency of measures to clean up permafrost areas from oil pollution, it is possible to recommend sowing seeds that have been pretreated by soaking in salicylic acid solutions with a concentration of 10^{-3} and 10^{-4} mol/l or humate.

В настоящее время нефть и нефтепродукты стали одними из самых распространенных загрязнителей почв и почвогрунтов. Наиболее безопасными с точки зрения экологии являются биологические способы очистки. Во многих случаях на завершающем этапе биоремедиационных работ в почву высаживают толерантные к нефтезагрязнению многолетние травянистые растения. Использование методов фитореимедиаии для восстановления техногенно нарушенных земель нашло широкое распространение в природоохранной сфере. Корневая система растений способна выделять в почву (ризосферу) различные метаболиты, окислительные и гидролитические ферменты, которые, по-видимому, и способствуют окислительной деструкции нефтезагрязнения. Как показали исследования, в случае загрязнения почв нефтью именно под влиянием растений процессами биодеградациии охватывается более широкий спектр нефтяных углеводородов, в результате чего состав почвенных битумоидов наиболее полно приближается к природному фону. Северные экосистемы наиболее ранимы, труднее и медленнее восстанавливаются. Холодный климат является дополнительным стресс-фактором для произрастания и выживания растений. Вследствие этого были проведены камеральные эксперименты по изучению возможности увеличения выживаемости растений в нефтезагрязненных почвах криолитозоны.

Для проведения лабораторных экспериментов была отобрана луговая почва Центральной Якутии, в которую добавляли нефть Талаканского месторождения. В одной серии экспериментов в почву добавляли нефть в количествах от 0,06 до 1,22 %, в другой – 5 и 10%. В первой серии экспериментов в загрязненную почву высевали семена полыни черной (Artemisia vulgaris L.) и клевера безлистного (Lepidium ruderae L.). Во второй серии – семена Вики посевной (*Vicia sativa*). Перед посевом семена Вики посевной обрабатывали в растворах биологически активных веществ (растворах препарата Байкал ЭМ-1, гуматов, салициловой кислоты 10^{-3} и 10^{-4} моль/л. Физиологические характеристики растений определяли по энергии прорастания (на 7-е сутки), всхожести семян (на 10-е сутки) и выживаемости проростков (на 60-е сутки, окончание эксперимента). Об уровне нефтезагрязнения судили по выходу хлороформного экстракта (ХЭ). Процессы трансформации нефтезагрязнения изучали с использованием методов жидкостно-адсорбционной хроматографии, ИК-Фурье спектроскопии и хроматомасс-спектрометрии.

Результаты экспериментов по высеванию клевера безлистного и полыни черной в нефтезагрязненные почвы показали, что физиологические характеристики растений (энергия прорастания, всхожесть, выживаемость) носят сложный

нелинейный характер в зависимости от количества добавленной в почву нефти, что указывает на адаптивную природу этих изменений.

Для увеличения адаптивного потенциала растений к фитопатогенам и неблагоприятным условиям среды в настоящее время успешно используется новое направление, суть которого заключается в усилении иммунного статуса растений благодаря воздействию на них различных биологически активных веществ и препаратов биологического и абиогенного происхождения. Вика посевная относится к толерантным к нефтезагрязнению травянистым растениям и часто используется для фиторекультивации нарушенных земель. С этим растением были проведены эксперименты по изучению возможности увеличения выживаемости проростков при произрастании их в нефтезагрязненной почве криолитозоны. Несмотря на значительные добавки нефти в почву (5% и 10%), предварительная обработка семян позволила увеличить выживаемость Вики посевной на нефтезагрязненной почве. Положительный эффект был достигнут благодаря замачиванию семян в растворах салициловой кислоты разной концентрации или растворе гумата, при этом наибольший стимулирующий эффект был отмечен при более высокой добавке нефти в почву, 10%.

Как показали результаты экспериментов увеличение степени деструкции нефтезагрязнения хорошо коррелировало с выживаемостью проростков ($K_{\text{корр}} = 0,9$), что также свидетельствует о большой роли растений в биодеградации нефтяных углеводородов. Наибольший эффект в повышении устойчивости Вики посевной к нефтезагрязнению по выживаемости проростков и степени деструкции нефтезагрязнения проявился в случае замачивания семян в растворах 10^{-4} М салициловой кислоты при 5%-ной добавке нефти, и 10^{-3} М – при 10%-ной добавке. При обработке семян раствором гумата калия был зафиксирован несколько меньший эффект. Препарат «Байкал ЭМ-1» оказал небольшой положительный эффект лишь при 5%-ной добавке нефти.

Протекторное действие гуминовых веществ объясняют не только образованием малоподвижных в почве и недоступных для живых организмов, нетоксичных комплексов с экотоксикантами, но и адаптогенной активностью, заключающейся в возрастании резистентности живых организмов к стрессовым нагрузкам, в частности, к химическому стрессу. Салициловая кислота в высоких концентрациях токсична для растений. Вместе с тем, небольшое ее содержание в жидкой фазе физиологической субстанции растений является важным показателем, связанным с проявлением иммунных реакций растений. Например, установлено наличие прямой корреляционной связи между концентрацией салициловой кислоты в растении и уровнем устойчивости его к болезням. Механизм действия салициловой кислоты состоит в ингибировании каталазы, что приводит к накоплению H_2O_2 . Увеличение содержания перекиси может оказывать заметное влияние на активацию процессов окислительной деструкции нефтезагрязнения. В случае воздействия сильного стресс-фактора (нефтезагрязнения) растения для выживания вынуждены прибегать к различным стратегиям адаптации. Наиболее подготовленными, по-видимому, оказываются те растения, чей адаптивный потенциал был активирован еще на стадии обработки семян. Небольшие концентрации салициловой кислоты, способны, вероятно, активировать адаптивные функции организма растений без причинения вреда самому организму.

Таким образом, на примере Вики посевной было показано, что замачивание семян в растворах биологически активных веществ может еще на стадии обработки семян увеличивать устойчивость растений, способствовать их выживанию в токсичной нефтезагрязненной среде. Для увеличения эффективности мероприятий по очистке территорий от нефтезагрязнений можно рекомендовать посев семян Вики посевной, которые прошли предварительную обработку путем замачивания их в растворах салициловой кислоты разной концентрации или гумата.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-45-140009.

ПРОБЛЕМЫ И ВОЗМОЖНЫЕ ВАРИАНТЫ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ДИЗЕЛЬНОЙ ГЕНЕРАЦИИ

Ефимов Н. К.², Васильев П. Ф.^{1, 2}

¹ Институт физико-технических проблем Севера им. В. П. Ларионова СО РАН

² Физико-технический институт, Северо-Восточный Федеральный университет им. М. К. Аммосова
г. Якутск, Россия

Аннотация. Потенциал повышения энергоэффективности дизельной генерации реально существует и может оцениваться в реальных деньгах. Снижение топливной составляющей является одним из приоритетных направлений.

В данной статье рассмотрены проблемы и возможные варианты модернизации и реконструкции дизельной генерации, в том числе рассмотрен положительный опыт АО «Сахаэнерго» Республики Саха (Якутия).

При оптимальных, для работы ветра-солнечной электростанции погодных условиях, электростанция становится основным (базисным) источником, таким образом, вся выработанная ею энергия передается в сеть, а роль «нивелирования» динамических нагрузок передается дизель-генератору. За счет, такой системы АО «Сахаэнерго» и смогла получить эффективность при использовании солнечных электростанций в гибридной схеме, без дорогостоящих накопителей (АКБ).

Если рассматривать установку накопителей на дизельную электростанцию (ДЭС), то получили бы весьма эффективную систему.

На примере Саскылахской ДЭС, рассмотрена эффективность снижения топливной составляющей, которая оснащена современными дизель-генераторными установками (ДГУ) и накопителями энергии.

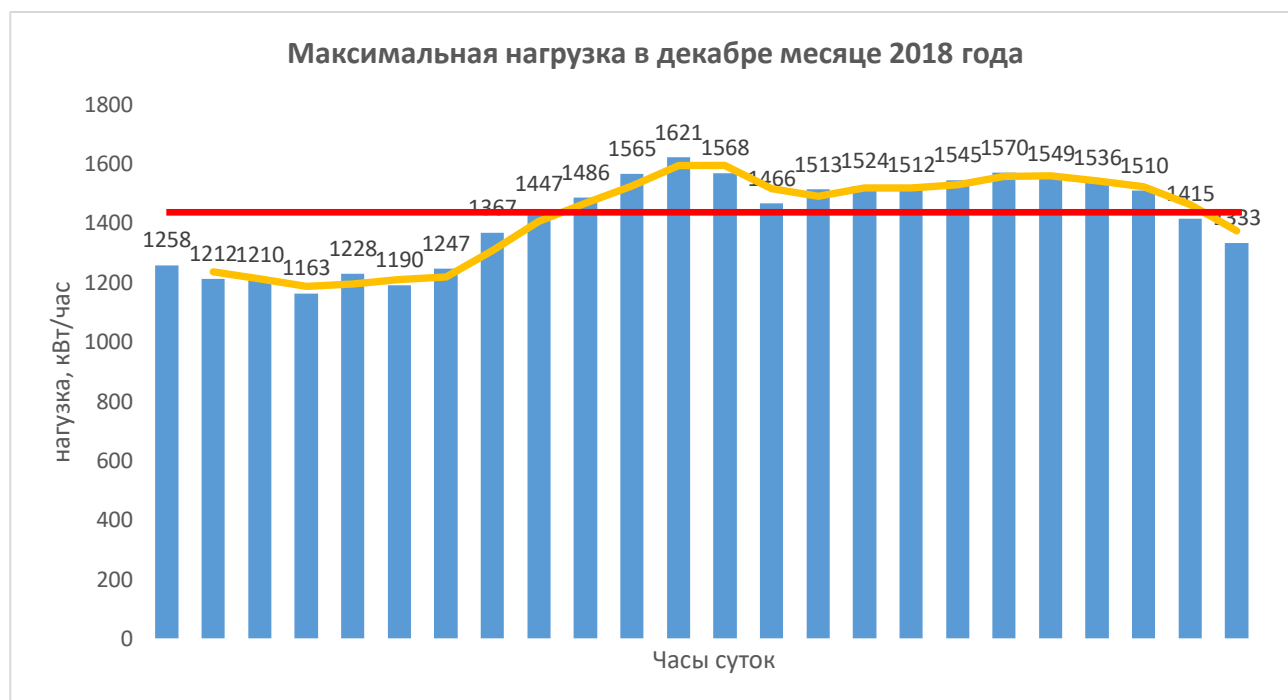


Рис. 1. График нагрузки Саскылахской ДЭС

Согласно графика нагрузок Саскылахской ДЭС максимальная нагрузка была достигнута в декабре месяце и составляет 1621 кВт, при этом минимальная составила 1163 кВт [1].

При использовании накопителя необходимо учесть время зарядки и разрядки накопителя, так чтобы объем заряда был немного выше объема разряда. На графике видно, что площади ниже и выше прямой практически одинаковы. В данном случае прямая линия соответствует нагрузке 1430 кВт. Под эти данные выбирается состав оборудования, которое должно работать круглые сутки без остановки в номинальном режиме. В нашем случае состав оборудования выбран следующий: (CAT 3412STA) две единицы и ДГР-520 одна единица, с общей мощностью 1450 кВт.

При работе по классической схеме, без накопителя были выбраны следующие составы оборудования: 1–7 часов Cummins 600 одна единица, ДГР-520 одна единица и (CAT 3406C), общей мощностью 1295 кВт; 8–24 часов ДГР-520 две единицы и Cummins 600 одна единица, общей мощностью 1640 кВт.

При расчете расхода топлива получилось следующее:

- при работе с накопителем – 8352 кг дизельного топлива;
- при работе по классической схеме – 8866,8 кг дизельного топлива.

Экономия топлива составила 514,8 кг в сутки, или 5%.

В годовом объеме потребления топлива равной 2,124 тыс. тонн, экономия может составить 106,2 тонн или 6,2 млн. рублей, при стоимости топлива 58247,08 руб. за 1 т без НДС, в ценах 2018 года [1].

Для обеспечения необходимой выработки накопителем в объеме 1697 кВт.час необходимо 308 единиц аккумуляторов емкостью 100 А*ч., что при стоимости одного АКБ типа AGM 18 тыс. рублей, составит 5,5 млн.рублей.

Проект может окупить себя за год, что при работе АКБ 10–12 лет, можно считать весьма эффективным.

Литература

1. Годовой отчет на 2018 год АО «Сахаэнерго». <http://sakhaenergo.ru>
2. Штерн В. И. Эксплуатация дизельных электростанций. – М.: Энергия, 1980. – 243 с.

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВОЛОКНИСТЫХ ПОЛИМЕРНЫХ СОРБЕНТОВ НА ПРИМЕРЕ С-ВЕРАД ДЛЯ ЛИКВИДАЦИИ РАЗЛИВОВ НЕФТИ И НЕФТЕПРОДУКТОВ

Ефимов С. Е.

Институт проблем нефти и газа СО РАН
Якутск, Россия

Аннотация. В работе приводятся результаты лабораторных исследований характеристик нетканого полимерного материала С-ВЕРАД, таких как водопоглощение и плавучесть, сорбционная способность по отношению к нефти и нефтепродуктам, а также их анализ как критериев оценки эффективности нефтесорбента.

Abstract. The paper presents the results of laboratory studies of the characteristics of non-woven polymer material C-VERAD, such as water absorption and buoyancy, sorption capacity for oil and petroleum products, and analyzes them as criteria for evaluating the effectiveness of an oil sorbent.

Наиболее эффективным, доступным и экономичным способом при ликвидации аварийных разливов нефти и нефтепродуктов является использование нефтесорбентов. Нефтесорбенты в зависимости от исходного сырья подразделяют на органические и неорганические [1]. В настоящее время все более широкое применение находят полимерные нетканые волокнистые материалы, полученные методом распыления расплава полимера газовым потоком в качестве высокоэффективных адсорбентов нефти

и нефтепродуктов [2]. В данной работе рассматривается сорбирующий нетканый волокнистый материал С-ВЕРАД (ООО «Приоритет») получаемый из полипропилена.

Эффективный сорбент должен отвечать определенным требованиям. Основными критериями, по которым оценивается эффективность, являются сорбционная способность к нефти и нефтепродуктам, плавучесть, гидрофобность, многократность использования (регенерация), технологичность изготовления и применения, низкая его стоимость.

Существует достаточно много методов количественной оценки сорбционных свойств, поэтому при выборе сорбента следует обращать внимание на то, каким методом было проведено испытание, так как различные методы могут показывать совершенно отличающиеся друг от друга результаты.

Исследования сорбционных свойств С-ВЕРАД проводились на нефти и нефтепродуктах: сборная товарная нефть из нефтепровода ВСТО (плотность 0,860 г/см³); дизельное топливо (зимнее); бензин АИ-95; гидравлическое масло.

Образцы сорбента на поверхности воды сохраняли плавучесть в течение 5 суток. Водопоглощение при этом составило 0,78 г/г. Водопоглощение с погружением на 1 сутки составило – 33,32 г/г. В погруженном состоянии сорбент впитывает воду в значительно большем объеме, что, скорее всего, связано с его гофрированной структурой.

Изначально определение нефтеемкости С-Верад была проведено по методике, описанной в работе Есенковой и др. [3]. Данная методика и полученные по ней данные моделируют идеализированные условия. Для получения результатов приближенных к более реальным условиям эксплуатации наиболее подходит ГОСТ-33627-2015 [4]. Полученные двумя разными методами результаты (таблица 1), демонстрируют существенную разницу численных значений показателей сорбционных свойств. Визуальные наблюдения показывают, что сорбент быстро насыщается нефтью и нефтепродуктами, за исключением гидравлического масла в связи с высокой степенью вязкостью. После изъятия из сорбента стекает довольно значительное количество сорбата, что говорит о невысокой удерживающей способности сорбента.

Таблица 1

Сорбционная емкость С-ВЕРАД по нефти и нефтепродуктам

Сорбционная емкость, г/г		
	Есенкова и др.	ГОСТ-33627-2015
Нефть	16,06	7,26
Дизельное топливо	15,27	5,54
Гидравлическое масло	21,58	-
Бензин	8,52	3,48

Эксперимент по очистке водной поверхности показал, что нефть впитывается в сорбент лишь на 0,3–0,4 см в области соприкосновения, т. е. проникновение нефти в сорбент не происходит и его объем не задействован в полной мере (толщина сорбента 2,5 см). Объясняется это, его формованием, структура сорбента слишком рыхлая, что также объясняет плохое удержание сорбированной нефти. Неполное использование объема сорбента, а также недостаточное удержание сорбированной нефти объясняются формованием С-ВЕРАД и его рыхлой структурой.

Несмотря на высокое водопоглощение, сорбционная емкость водонасыщенного сорбента, определенная по методике, описанной в патенте РФ [5] составила – 16,321 г/г.

Таким образом, проведенные лабораторные эксперименты показывают наибольшую эффективность применения сорбента в качестве фильтрующего элемента в системах очистки. Он легко впитывает воду с загрязнителем и удерживает его в своем объеме.

Литература

1. Гареев М.М., Зинатшина А. В., Бахтизина А.Р. Исследование сорбционной емкости сорбента «ЭКО-СОРБ» в условиях отрицательных температур // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. – 2016. – № 4. – С. 60.
2. Байбурдов Т.А., Шиповская А.Б. Полимерные сорбенты для сбора нефтепродуктов с поверхности водоемов: обзор русскоязычной литературы за 2000-2017 г.г. (часть 3) // Изв. Сарат. ун-та. Нов. сер. Сер. Химия. Биология. Экология. – 2018. – Т. 18. – Вып. 3. – С. 287.
3. Есенкова Н.П., Михалькова А. И., Бачерникова С. Г. Нетканые сорбенты для сбора разливов нефтепродуктов и экспресс-метод определения их сорбционной емкости // НефтьГазПромышленность. – 2004. – № 3. [URL: <http://oilgasindustry.ru/?id=3804>]
4. ГОСТ Р 54872-2011. Полотна нетканые и изделия из них. Методы определения впитываемости / Гос. стандарты. – Изд. офиц. – М.: ФГУП «СТАНДАРТИНФОРМ», 2012.
5. Пат. 2539751 РФ, МПК7 G 01 N 30/00. Способ определения нефтеемкости водонасыщенных сорбентов / Ефимов С. Е., Герасимов А. И. ; заявитель и патентообладатель Ин-т проблем нефти и газа СО РАН. – № 2013136807/13 ; заявл. 06.08.2013 ; опубл. 10.12.2014, Бюл. № 34.

ОБНАРУЖЕНИЕ РМТ-ЗОНДИРОВАНИЕМ ЕСТЕСТВЕННЫХ И ТЕХНОГЕННЫХ ПРОВОДЯЩИХ ЗОН В МЕРЗЛЫХ ГРУНТАХ ДЛЯ УСТРОЙСТВА ЗАЗЕМЛЕНИЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

Ефремов В. Н.

Институт мерзлотоведения им. П. И. Мельникова СО РАН

Якутск, Россия

Аннотация. Проводящие образования в мерзлых грунтах могут быть использованы в качестве среды, обеспечивающей достаточное растекание токов от заземлителей. Для обнаружения проводящих зон в мерзлых грунтах предлагается применить РМТ зондирование. Приведены примеры успешного обнаружения и оценки параметров проводящих зон в мерзлых грунтах.

Abstract. As environment ensuring sufficient movement of currents from devices of grounding, the conducting formations in frozen grounds can be used. It is offered to apply to detection of conducting zones in frozen grounds PMT sounding. The examples of successful detection and estimations of parameters of conducting zones in frozen grounds are given.

Низкая проводимость мерзлых грунтов является давней и серьезной проблемой для устройства в них заземлений, обеспечивающих необходимое растекание токов. Однако, мерзлые грунты не являются сплошной плохопроводящей средой. Находящиеся в мерзлых грунтовых массивах таликовые, водонасыщенные и минерализованные зоны, тонкие проводящие слои могут служить проводящей средой для устройства заземлителей [1]. Техногенное загрязнение грунтов создает дополнительные таликовые зоны и проводящие образования. Как показывает наработанный нами опыт и материалы радиоимпедансного зондирования (РИЗ) мерзлых грунтов [2, 3], обнаружить проводящие зоны может получившее распространение в последние годы радиоманнитотеллурическое (РМТ) зондирование [4].

РМТ зондирование основано на том же принципе, что и РИЗ. В нем используется широкодоступная цифровая аппаратура с программным обеспечением, позволяющим интерпретировать результаты съемки в 2D и 3D форматах, т. е. получать геоэлектрические разрезы и объемное изображение грунтовой среды. Применение РМТ зондирования на мерзлых грунтах благоприятно тем, что они, являясь плохопроводящими,

контрастны по удельному электрическому сопротивлению (УЭС) с искомыми проводящими зонами и образованиями. РМТ, как и РИЗ, четко выделяет проводящие объекты в криолитозоне.

Наиболее приемлемыми для рационального обеспечения эффективного заземления представляются надмерзлотные талики, сохраняющие проводящее состояние круглогодично. Например, неглубоко залегающая круглогодично талая проводящая зона обнаружена нами в пригороде Якутска на профиле РИЗ длиной 100 м, пройденном в марте по заболоченному участку (рис. 1).

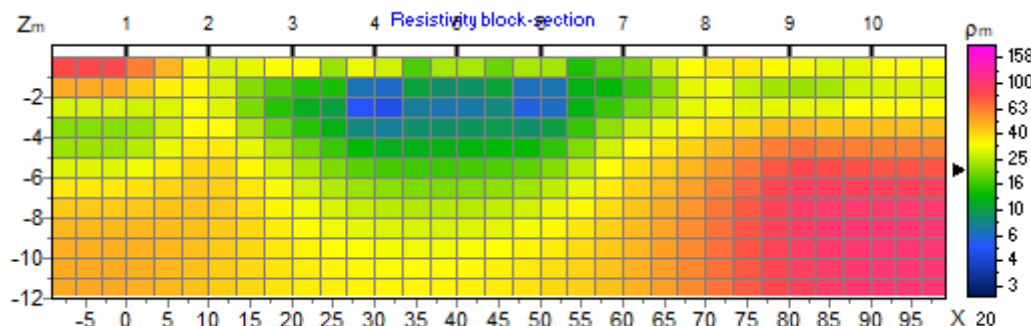


Рис. 1. Геоэлектрический разрез с надмерзлотным таликом в пригороде Якутска

По результатам РИЗ проводящая зона длиной более 50 м и толщиной от 2 до 6 м, имеющая УЭС от 5 до 25 Ом м, находится на глубине 1 м. По результатам бурения в апреле на пикете 3 талые породы представлены засоленными песками мощностью 2.5 м, с влажностью от 28 до 44%, перекрытыми льдом (0.15 м), мерзлым илом (0.22 м) и мерзлыми супесями (1.8 м). Подстилают талик многолетнемерзлые пески.

Для эффективных заземлений в мерзлых грунтах представляют интерес и межмерзлотные талики. Протяженный межмерзлотный талик был обнаружен нами РМТ зондированиями по профилю длиной 450 м на средней и высокой поймах р. Лена в районе п. Старая Табага (рис. 2). Талая проводящая зона протяженностью более 400 м, мощностью 10-15 м, с УЭС меньше 50 Ом м представлена водоносными отложениями, перекрытыми мерзлыми песками с УЭС 300-500 Ом м. Такая таликовая зона будет вполне приемлема для устройства заземлений и растекания токов от них.

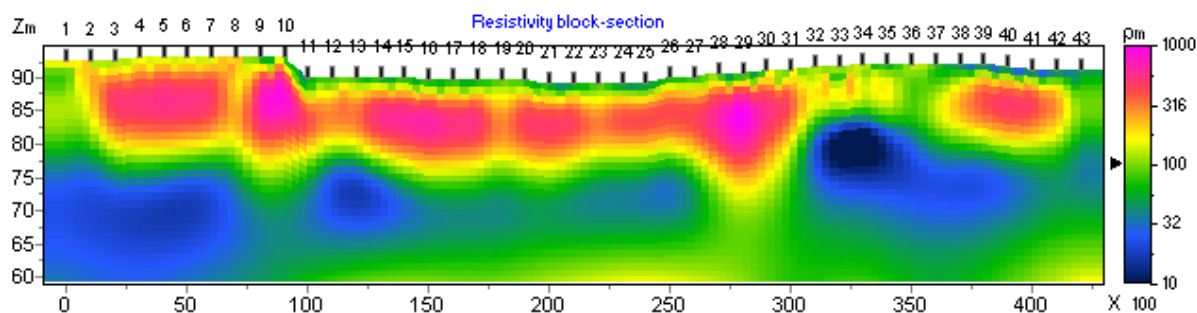


Рис. 2. Геоэлектрический разрез с межмерзлотным таликом в районе п. Старая Табага.

Таким образом, над- и межмерзлотные талики, водоносные горизонты, тонкие проводящие слои и засоленные отложения в мерзлых грунтах могут быть использованы в качестве среды, достаточной для растекания токов от заземлителей. Обнаружить и оценить параметры таких проводящих образований в мерзлых грунтах позволит проведение геофизической съемки РМТ зондированием.

Литература

- Ефремов В.Н., Кобылин В.П. Патент Российской Федерации на изобретение № 2181918. Способ выполнения заземления в многолетнемерзлых грунтах // Изобретения. Полезные модели. Официальный бюллетень Российского агентства по патентам и товарным знакам. – 2002 г. – № 12, ч. II. – М.:ФИПС. – С. 325.

2. Ефремов В.Н., Дедюкина Н.Д. Поиск тонких проводящих слоев в многолетнемерзлых грунтах для выполнения заземлений // Труды I Евразийского симпозиума по проблемам прочности материалов и машин для регионов холодного климата. Часть IV. – Якутск, 2002. – С.200-205.
3. Ефремов В.Н. О возможности использования тонких проводящих слоев в многолетнемерзлом грунте для рационального выполнения заземлений // Электрические станции. – №1, 2006. – С.62-64.
4. Сараев А.К., Симаков А.Е., Шлыков А. А. Метод радиоманнитотеллурических зондирований с контролируемым источником // Геофизика. –2014. – №1. – С. 18-25.

РАЗВИТИЕ ТЕХНИКИ ЭКСПЕРИМЕНТА В ОБЛАСТИ СУПЕРКАВИТАЦИОННЫХ ТЕЧЕНИЙ

Кулагин В. А., Радзюк А. Ю., Истягина Е. Б.
Сибирский федеральный университет,
Красноярск, Россия

Аннотация. Совершенствование кавитационных технологий в промышленности представляется стратегически важной задачей с точки зрения стабильного и долгосрочного роста российской экономики, в том числе, за счёт развития регионов Сибири и Арктики. Не смотря на существенные успехи в области математического моделирования суперкавитационных течений как основы этих технологий, важным аспектом развития в этой области остаются экспериментальные исследования. Методики и оборудование для изучения сложных процессов, происходящих в аппаратах кавитационных технологий, постоянно совершенствуются и развиваются. В статье обобщён опыт создания и эксплуатации больших гравитационных гидродинамических труб с малыми числами Эйлера для изучения процессов кавитации в натуральных условиях и движения тел в жидкости с большими скоростями. Освещаются некоторые результаты по созданию установок для экспериментальных модельных исследований в лабораториях Сибирского федерального университета на кафедре теплотехники и гидрогазодинамики. Авторы информируют о создании Российско-китайской международной лаборатории кавитационных технологий и формулируют направления дальнейших работ.

Abstract. Improving cavitation technologies in industry seems to be a strategically important task from the point of view of stable and long-term growth of the Russian economy, including through the development of the regions of Siberia and the Arctic. Despite significant advances in the mathematical modeling of supercavitation flows as the basis of these technologies, experimental research remains an important aspect of development in this area. Techniques and equipment for studying complex processes occurring in cavitation technology devices are constantly being improved and developed. The article summarizes the experience of creating and operating large gravitational hydrodynamic tubes with low Euler numbers for studying cavitation processes in natural conditions and the motion of bodies in a liquid at high speeds. Some results on the creation of installations for experimental model research in the laboratories of the Siberian Federal University at the Department of Heat Engineering and Fluid Dynamics are highlighted. The authors inform about the creation of the Russian-Chinese international laboratory of cavitation technologies and formulate directions for further work.

На данном этапе развитие северных и арктических территорий представляет стратегическую важность для устойчивого и безопасного социально-экономического и научно-технологического развития России (где сосредоточена подавляющая часть природных ресурсов страны), повышения уровня и качества жизни населения и человеческого потенциала с учетом индивидуальных стратегических рисков. В связи с этим, на первый план выходит задача обеспечения техногенной, экологической и энергетической безопасности сложных технических объектов и циркумполярных регионов в целом. Проблема развития традиционных и новых научных направлений в интересах северных территорий России приобретает особую актуальность. При этом надо учитывать

экстремальные климатические, сложные горно-геологические и крайне неблагоприятные социально-экономические условия ведения промышленных работ.

Гидравлические исследования высокоскоростных многофазных потоков, являющихся основой большинства технологических процессов в теплоэнергетике, охране водных объектов и др., трудно поддаются теоретическому исследованию. Этим объясняется тот факт, что и в настоящее время большую роль в гидродинамических исследованиях, и особенно в исследованиях кавитационных процессов, играет эксперимент. В последние десятилетия активно развиваются промышленные технологии, основанные на эффектах гидродинамической кавитации, имеющие достаточную эффективность и широкий спектр приложений: получение nano композиционных материалов с нетривиальными физико-механическими свойствами, приготовление водо-топливных смесей, характеризующихся снижением вредных выбросов в окружающую среду при их сжигании, технологии очистки промышленных стоков и борьбы с разливами нефтепродуктов в условиях чрезвычайных ситуаций и многое другое [1–6]. Для изучения теплофизических эффектов в суперкавитационных течениях в технологических аппаратах были задействованы экспериментальные установки различной степени масштабирования кавитационных воздействий на обрабатываемые гетерогенные, как правило, среды [7–10]. Экспериментальные результаты явились основой для численных исследований в этой области [11–16] и развития техники эксперимента [17–21]. Повышенный интерес к исследованиям гидродинамики больших скоростей привел к тому, что гидродинамические трубы стали необходимой принадлежностью не только научно-исследовательских, но и проектных организаций и даже учебных вузов соответствующего профиля [9].

С целью развития исследований в этой сфере науки и техники в Сибирском федеральном университете создана Российско-Китайская международная лаборатория кавитационных технологий в рамках стратегического Соглашения о сотрудничестве между СФУ и Институтом высоких технологий Академии наук провинции Хэйлунцзян. В задачи этой лаборатории входят, в частности, разработка энергоресурсосберегающих технологий в сфере жизнеобеспечения мегаполисов: нетрадиционные подходы и новые пути использования техногенных отходов, развитие кавитационного кондиционирования природных и сточных вод, включая потребности арктического региона и формирования оборотного водопользования конкретных предприятий (реализация национального проекта «Экология» в части федеральных проектов «Отходы» и «Чистая вода»), разработка и адаптация технологий умного дома.

Литература

1. Ивченко В.М., Кулагин В. А., Немчин А.Ф. Кавитационная технология: Монография. Красноярск: Изд-во КГУ, 1990. – 200 с.
2. Кулагин В. А. Гидродинамические воздействия на жидкости, золи, смеси и твердые границы потоков // Вестник КГТУ. Вып.8. Красноярск: Изд. КГТУ, 1997.
3. Ивченко В.М., Кулагин В. А., Есиков С.А., Лаврик Н.Л. Кинетика кавитационного воздействия на элементы гидротехнических сооружений и гидроэнергетического оборудования // Известия ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева. Т. 200. Л.: Энегтоатомиздат, 1987. С. 43–48.
4. Евстигнеев В. В., Кулагин В. А. Кавитация в технологиях очистки сточных вод // В мире научных открытий. 2010. № 5 (11). Ч.1. С. 87–90.
5. Демиденко Н.Д., Кулагин В. А., Шокин Ю.И., Ли Ф.-Ч. Тепломассообмен и суперкавитация: Монография Новосибирск: Наука, 2015. – 436с. ISBN 978–5–02–019206–5.
6. Kulagin V.A., Sapoghnikova E.S., Stebeleva O.P., Kashkina L.V., Zheng Zhi-Ying, Li Qian, Li Feng-Chen Features of influence of cavitation effects on the physicochemical properties of water and wastewater // J. Sib. Fed. Univ. Eng. technol., 2014, 7(5). С. 605–614.
7. Кулагин В. А., Москвичев В. В., Махутов Н.А., Маркович Д.М., Шокин Ю.И. Физическое и математическое моделирование в области гидродинамики больших скоростей на экспериментальной базе Красноярской ГЭС // Вестник Российской академии наук. 2016. Т. 86, № 11, С. 978–990: DOI: 10.7868/S0869587316110062 (SCOPUS, WoS; IF 6.603, Q1).
8. Кулагин В. А. Экспериментальная база при Красноярской ГЭС. В книге: Оптимальные гидрореактивные системы. / Ивченко В.М., Григорьев В. А., Приходько Н.А. Красноярск, 1985. С. 166–216.

9. Витер В.К. Кулагин В. А. Крупномасштабные гравитационные гидродинамические трубы: Монография. Красноярск: ИПЦ КГТУ, 2006. 243 с.
10. Likhachev D.S., Li Feng-Chen, Kulagin Vladimir A. Experimental study of thermohydrodynamic characteristics of a rotational supercavitating evaporator for desalination // Sci. China. Tech. Sci., 2014, 57: 2115–2130, doi: 10.1007/s11431-014-5631-0 (SCI, EI indexed, Impact Factor: 1.192);
11. Zhi-Ying Zheng, Qian Li, Lu Wang, Li-Ming Yao, Wei-Hua Cai, Vladimir A. Kulagin, Hui Li, Feng-Chen Li Numerical study on the effect of steam extraction on hydrodynamic characteristics of rotational supercavitating evaporator // Desalination 455 (2019) 1–18; doi.org/10.1016/j.desal.2018.12.012 (SCOPUS, WoS; IF 6.603, Q1).
12. Qian Li, Zhi-Ying, Feng-Chen Li, Vladimir A. Kulagin Numerical study on the characteristics of natural supercavitation by planar symmetric wedge-shaped cavitators for rotational supercavitating evaporator // Science China Technological Sciences. 2015. Vol. 58. Issue 6. P. 1072–1083; doi: 10.1007/s11431-015-5827-y (SCI, EI indexed, IF 1.192).
13. Likhachev D.S., Li Feng-Chen, Vladimir A. Kulagin Experimental study of thermohydrodynamic characteristics of a rotational supercavitating evaporator for desalination // Sci. China. Tech. Sci., 2014, 57: 2115–2130, doi: 10.1007/s11431-014-5631-0 (SCI, EI indexed, Impact Factor: 1.113).
14. Kulagin V.A., Pyanykh T.A. Modeling of processes in supercavitation evaporator with consideration of thermodynamic effects // Chemical and Petroleum Engineering. Vol. 50. 2014. P. 24–29. DOI 10.1007/s10556-014-9848-3.
15. Кулагин В. А., Пьяных Т.А. Исследование кавитационных течений средствами математического моделирования // Журнал сиб. федер. ун-та. Техника и технологии. 2012, 5(1). С. 57–62.
16. Goel T., Zhao J., Thakur S., Haftka R.T., Shyy W., Zhao J. // International Journal for Numerical Methods in Fluids. 2008. V. 58. P. 969–1007.
17. Radzyuk A.Yu., Kulagin V.A., Istyagina E.B., Panykh T.A. Modernization of the cavitation stand for the investigation of two-phase flow regimes, J. Sib. Fed. Univ. Eng. technol., 2019, 12(4), 468-475. DOI: 10.17516/1999-494X-0155
18. Vladimir A Kulagin, Alexander U Radzyuk, Elena B Istyagina and Tatyana A Panykh Experimental stand for the study of cavitation flow regimes. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 450 (2018) 032023; doi:10.1088/1757-899X/450/3/032023 [2018 IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 450 032023]
19. Alexander Yu Radzyuk, Vladimir A Kulagin, Elena B Istyagina, Tatyana A Panykh and Mike V Kolosov Determination of the flow regime using the experimental hydrodynamic stand. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 537 (2019) 042080; doi:10.1088/1757-899X/537/4/042080 [2019 IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 537 042080]
20. Radzyuk A Yu, Kulagin V A, Istyagina E B, Pyanykh T A and Kolosov M V Numerical simulation of supercavitation in the constrained flow. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science (EES) 315 (2019) 032027 ; doi: 10.1088/1755-1315/315/3/032027
21. Radzyuk A.Yu., Kulagin V.A., Istyagina E.B., Pyanykh T.A. and Grishina I.I. The determination of the dependence of the cavern length on the flow velocity on an experimental hydrodynamic workbench, Journal of Physics: Conf. Ser.: 1399 (2019) 022050; doi:10.1088/1742-6596/1399/2/022050.

РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ОБЪЕКТОВ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ МАЛОЙ МОЩНОСТИ В УСЛОВИЯХ ХОЛОДНОГО КЛИМАТА СЕВЕРА И АРКТИКИ

Местников Н. П.^{1, 2}, Васильев П. Ф.^{1, 2}

¹ Северо-Восточный федеральный университет имени М. К. Аммосова

² Институт физико-технических проблем Севера СО РАН им. В. П. Ларионова
Якутск, Россия

Аннотация. Статья посвящена вопросам разработки и изучения моделирования солнечной электростанции малой мощности в условиях холодного климата. Необходимо отметить, что объекты генерации северной части Якутии имеют децентрализованную систему в виде дизельных генераторов и, поэтому изучение особенностей работы возобновляемой энергетики имеет высокую актуальность. Однако в рамках обеспечения достоверности проектирования объектов солнечной энергетики необходима разработка моделирования по данным объектам.

Ключевые слова: закономерности, моделирование, *MathCad*, солнечная панель, система накопления энергии.

Abstract. The article is devoted to the development and study of modeling of a low-power solar power plant in cold climate conditions. It should be noted that the generation facilities of the northern part of Yakutia have a decentralized system in the form of diesel generators and, therefore, the study of the features of the work of renewable energy is of high relevance. However, in order to ensure the reliability of the design of solar power objects, it is necessary to develop modeling for these objects.

Key words: patterns, modeling, MathCad, solar panel, energy storage system.

В целях проведения научно-исследовательской работы по вышеуказанной теме выбран Северо-Восточный регион Российской Федерации – Республика Саха (Якутия), где 13 муниципальных районов входят в арктическую часть России в соответствии с территориальными и климатическими требованиями.

Однако в настоящий момент энергоснабжение потребителей северной части Республики Саха (Якутия) производится посредством эксплуатации отдельных объектов автономной генерации тепла и электроэнергии, которые являются объектами децентрализованной системы тепло- и электроснабжения.

Вместе с тем более 95,00% от всего объема генерации электроэнергии в северном энергетическом районе Якутии производится посредством эксплуатации объектов традиционной энергетики, функционирующие на принципе сжигания дизельного и угольного топлива.

Кроме того, авторами данной статьи разработаны математическое моделирование комбинированной электростанции исполнения «Дизель + Солнце» с учетом внешних параметров окружающей среды резко-континентального климата Республики Саха (Якутия) и силового оборудования, представленная на рис. 1.

Также особо необходимо отметить, что авторами статьи получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ от 23.12.2020 года №2020667411 с учетом перевода программы на язык лицензированной программы Microsoft Office Excel в целях увеличения технической доступности и обеспечения массового пользования, где внешний вид представлен на рис. 2. В этой связи авторами статьи производятся предварительные переговоры с отраслевыми министерствами и ведомствами Республики Саха (Якутия) в целях внедрения данной разработки в практическое пользование.



Рис. 1. Блок-схема функционирования программы для ЭВМ

Посредством использования вышеуказанной программы для ЭВМ потенциальный пользователь может получить основные параметры, такие как: период автономной работы без дизельных генераторов, дисконтированный срок окупаемости, объем экономии дизельного топлива и другие.

Abstract. The article is devoted to the development and study of modeling of a low-power wind power plant in cold climate conditions. It should be noted that the generation facilities of the northern part of Yakutia have a decentralized system in the form of diesel generators and, therefore, the study of the features of the work of renewable energy is of high relevance. However, in order to ensure the reliability of the design of wind power objects, it is necessary to develop modeling for these objects.

Key words: patterns, modeling, MathCad, wind generator, energy storage system.

В целях проведения научно-исследовательской работы по вышеуказанной теме выбран Северо-Восточный регион Российской Федерации – Республика Саха (Якутия), где 13 муниципальных районов входят в арктическую часть России в соответствии с территориальными и климатическими требованиями.

Однако в настоящий момент энергоснабжение потребителей северной части Республики Саха (Якутия) производится посредством эксплуатации отдельных объектов автономной генерации тепла и электроэнергии, которые являются объектами децентрализованной системы тепло- и электроснабжения.

Вместе с тем более 95,00% от всего объема генерации электроэнергии в северном энергетическом районе Якутии производится посредством эксплуатации объектов традиционной энергетики, функционирующие на принципе сжигания дизельного и угольного топлива.

Кроме того, авторами данной статьи разработаны математическое моделирование комбинированной электростанции исполнения «Дизель + Ветер» с учетом внешних параметров окружающей среды резко-континентального климата Республики Саха (Якутия) и силового оборудования, представленная на рисунке 1.

Также особо необходимо отметить, что авторами статьи получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ от 21.12.2020 года №2020667205 с учетом перевода программы на язык лицензированной программы Microsoft Office Excel в целях увеличения технической доступности и обеспечения массового пользования, где внешний вид представлен на рисунке 2. В этой связи авторами статьи производятся предварительные переговоры с отраслевыми министерствами и ведомствами Республики Саха (Якутия) в целях внедрения данной разработки в практическое пользование.



Рис. 1. Блок-схема функционирования программы для ЭВМ

Посредством использования вышеуказанной программы для ЭВМ потенциальный пользователь может получить основные параметры, такие как: период автономной работы без дизельных генераторов на энергии ветра, дисконтированный срок окупаемости, объем экономии дизельного топлива и другие.

Abstract. This article is devoted to the study and study of the influence of the sharply continental climate of the Republic of Sakha (Yakutia) on the functioning of a single-crystal solar panel as part of the behavior of experimental work for the spring. It should be noted that the generation facilities of the northern part of Yakutia have a decentralized power supply system in the form of diesel generators and, thus, the study of the features of the work of renewable energy is of high relevance.

Key words: single crystal solar panel, surface dust, EPEVER system, operation monitoring, North, Yakutia.

Настоящая статья посвящена исследованию влиянию резко-континентального климата Якутии на функционирование объектов солнечной энергетики с монокристаллическими солнечными панелями для питания удаленных и стационарных потребителей электроэнергии, размещенные на территории северной части Дальнего Востока России, а именно Крайнего Севера и Арктики. Важно отметить, что электроснабжение данного вида потребителей на Севере производится посредством эксплуатации дизельных генераторов мощностью 2,4 и 5 кВт, где удельная себестоимость электроэнергии составляет от 40 рублей за 1 кВт*ч. Особо следует выделить, что на территории Крайнего Севера и Арктика уровень качества транспортной инфраструктуры находится на низком уровне, а именно полное отсутствие железнодорожных магистралей и круглогодичной автомобильной дороги. В этой связи удельная стоимость комплектующих и горюче-смазочных материалов для дизельных генераторов увеличивается на 100–150% при сроках доставки от двух лет.

Отсюда следует вывод, что удаленным и стационарным потребителям электроэнергии необходимо внедрение энергетически эффективных технологий в целях увеличения доли экономии горюче-смазочных материалов и уменьшения степени изношенности действующих дизельных генераторов, где технически и экономически возможным решением является внедрение солнечных электростанций с различным диапазоном мощностей, начиная с 100 Вт до 1 МВт.



Рис. 1. Внешний вид энергоустановки СЭ-50

В рамках выполнения практической части исследования авторами статьи спроектирована, разработана и собрана экспериментальная солнечная энергоустановка СЭ-50, которая включает в себе следующие элементы: гибкая монокристаллическая

солнечная панель мощностью 50 Вт, контроллер заряда системы *EPEVER*, аккумуляторная батарея емкостью 75 А*ч и вспомогательное оборудование, где на рисунке 1 представляется внешний вид установки.

Вместе с тем авторами статьи проведен мониторинг электроэнергетических характеристик СЭ-50, где на рисунке 2 представляется график мощности генерации данного объекта в ходе проведения эксперимента с 10:30 по 12:30 часов после полуночи в г. Якутске.

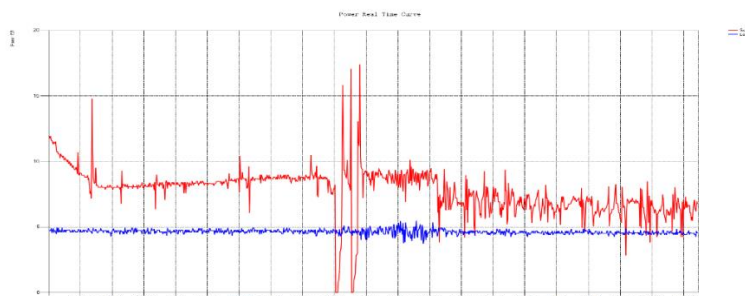


Рис. 2. График мощности генерации СЭ-50

Выводы:

1. В ходе проведения экспериментальных работ авторами статьи успешно разработана экспериментальная установка солнечной энергетики СЭ-50 с функцией регистрации и мониторинга данных генерации.

2. Из рисунка 2 видно, что генерации монокристаллической панели прямо пропорционально зависима от солнечной активности и облачности на определенный период времени.

Литература

1. Местников Н. П. Разработка децентрализованной системы электроснабжения на основе использования дизельной и солнечной энергетики. В материалах международной конференции «НЗ4 Наука и образование» – Ч. II. – Воронеж: ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ, 2018. – С. 495.
2. Местников Н. П. Разработка децентрализованной системы электроснабжения малочисленных населенных пунктов Якутии. Материалы IX Международной конференции. Издательство: Казанский государственный энергетический университет (Казань) – С. 390.

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТЕПЛОВОГО РЕЖИМА УГЛЕВОДОРОДНОГО ТОПЛИВА ПРИ ЕГО ТРАНСПОРТИРОВКЕ В УСЛОВИЯХ ПОНИЖЕННЫХ ТЕМПЕРАТУР

Кораблев В. А.¹, Минкин Д. А.², Шарков А. В.¹

¹ Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

² Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. Работа посвящена вопросам обеспечения необходимого уровня температур углеводородного топлива при его транспортировке по трубопроводу. Для этого разработана методика расчета и выбора параметров проточных электрических подогревателей для выполнения проектировочных расчетов кожухотрубных подогревателей. Процесс вычислений и определения необходимых теплофизических свойств подогреваемых сред автоматизирован и реализован с помощью программного приложения. Выполнено сравнение результатов расчетов с параметрами подогревателей, находящихся в эксплуатации.

Обеспечение необходимого температурного режима в процессе транспортировки углеводородного топлива является одним из путей решения проблемы гидратообразования и отложения парафинов в трубопроводах. Для обеспечения требуе-

мого уровня температур топлива наряду с другими методами используются проточные электрические подогреватели. В настоящей работе представлена методика расчета и выбора параметров кожухотрубных подогревателей для выполнения проекторочных расчетов. Для автоматизации процесса вычислений разработана программное приложение, которое позволяет рассчитывать интенсивность теплообмена, площадь поверхности теплообмена, мощность и количество нагревательных элементов, температуру их поверхностей в зависимости от направления движения и вида подогреваемой среды. Предусмотрена возможность автоматического выбора теплофизических свойств для ряда жидкостей и газов в широком диапазоне температур и давлений. Сравнение получаемых результатов с параметрами подогревателей, находящихся в эксплуатации, показало удовлетворительную сходимость.

Рис. 1. Рабочее окно программы

HYDROCARBONIC FUEL HEAT REGIME PROVIDING IN PROCESS OF ITS TRANSPORTING AT LOW TEMPERATURE CONDITIONS

Korablev V. A.¹, Minkin D. A.², Sharkov A. V.¹

¹ ITMO University, Saint-Petersburg, Russian Federation

² Saint-Petersburg University of the State Fire Service of EMERCOM of Russia, Saint-Petersburg, Russian Federation

Abstract. Article is devoted to problem of necessary level of temperature providing in case of hydrocarbonic fuel transporting down the pipes. Methodology and program for automation and choice of heater's parameters were developed for calculating of shell and pipe exchanger construction. Calculating process was automated and realized with help of program application. Comparison of calculation results with parameters of exploited heaters was hold.

Providing of necessary temperature regime during the transporting of hydrocarbonic fuel is one of methods for solving the problem of hydrate formation and parafine deposits in the pipes. Among the methods of fuel temperature level forming is usage of electrical heaters. In paper calculation and choice methodology of heaters parameters are considered for designing of shell and pipe exchanger construction. Program application was created for automation of calculating process. Program allows to compute intensity and surface area of heat exchange, power output and number of heating elements, temperature of its surfaces according to direction of stream and type of heated substance. It provides the opportunity of automatic thermophysical properties selection for set of fluids and gases in wide range of

temperatures and pressures. Comparison of received calculating results with data of exploited heaters indicates satisfactory conformity.

Fig. 1. Working window of program

СИСТЕМАТИЗАЦИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КОМПЛЕКСНОЙ ОЦЕНКИ ВОЗДЕЙСТВИЯ ОБЪЕКТОВ ЭНЕРГЕТИКИ НА ПРИРОДНУЮ СРЕДУ АРКТИЧЕСКОГО СЕКТОРА ЯКУТИИ

Николаева Н. А.

Институт физико-технических проблем Севера им. В. П. Ларионова СО РАН,
г. Якутск, Россия

Аннотация. Освоение минерально-сырьевых ресурсов и развитие энергетики в арктической зоне Якутии сопровождается все более усиливающимся воздействием на природные ландшафты. В условиях их крайне низкой устойчивости к любым воздействиям необходимы оценка и поиск направлений снижения последствий промышленного освоения. В связи с этим разработана схематическая модель систематизации показателей экологических и социально-экономических последствий функционирования энергоснабжающих объектов на примере бассейнов рек Яны, Индигирки и Колымы в соответствии с закономерностями строения, процессов и изменения ландшафтной структуры.

Ключевые слова: Арктика, энергетика, воздействие, систематизация показателей, ландшафты.

Abstract. The development of mineral resources and the development of energy in the Arctic zone of Yakutia is accompanied by an ever increasing impact on natural landscapes. In conditions of their extremely low resistance to any impacts, it is necessary to assess and search for ways to reduce the consequences of industrial development. In this regard, a schematic model has been developed for the systematization of indicators of the environmental and socio-economic consequences of the functioning of energy supplying facilities on the example of the basins of the Yana, Indigirka and Kolyma rivers in accordance with the patterns of structure, processes and changes in the landscape structure.

Key words: Arctic, energy, impact, systematization of indicators, landscapes.

В целях решения проблем энергетической безопасности страны одним из наиболее приоритетных государственных направлений является интенсификация освоения огромного потенциала минерально-сырьевых ресурсов Северо-Востока России, в том числе в арктической зоне Республики Саха (Якутия) [1]. При этом любое техногенное вмешательство в природную среду, происходящее при разработке горнодобывающей

отрасли и строительства необходимой инфраструктуры, включающей энергопроизводство, влечет за собой негативные изменения в природной среде Севера.

На исследуемой части арктической территории Якутии, включающей бассейны рек Яны, Индигирки и Колымы, горнодобывающая промышленность территориально имеет локальное распространение, но ее значение для экономической и национальной безопасности страны неоспоримо. Энергетические объекты на изучаемой территории представлены в основном дизельными энергетическими установками с локальным воздействием на природную среду, а также одной мини-ТЭЦ в п. Депутатский Усть-Янского улуса. Альтернативные источники энергии представлены 7-ю солнечными электростанциями.

Экологическое воздействие этих электростанций незначительно, но, тем не менее, в экстремальных природно-климатических условиях они представляют собой очаги прямого и косвенного воздействия на все компоненты ландшафтов в силу существующих горизонтальных и вертикальных взаимосвязей. Основным фактором риска является крайне низкая степень устойчивости северных ландшафтов к техногенной нагрузке.

Для оценки социально-экономических и экологических последствий функционирования энергоснабжающих объектов и разработки рекомендаций по рациональному природопользованию в арктическом секторе Якутии была разработана схематическая модель систематизации показателей экологических и социально-экономических последствий их функционирования на примере бассейнов рек Яна, Индигирка и Колыма, которая дает возможность изучить связи между показателями, получить комплексную экологическую оценку последствий и обозначить экологические критерии, необходимые для разработки путей рационального природопользования.

Основной методикой исследования явился геоэкологический подход, который основывается на изучении процессов воздействия хозяйственной деятельности на природную среду; изменений в природной среде; последствий воздействий, отражающихся на природных и социальных условиях [2,3].

Были сгруппированы показатели воздействия на природную среду от ДЭС, ТЭЦ, ГТУ-ТЭЦ, а также угольных разрезов и шахт: объемы и состав выбросов в атмосферу загрязняющих веществ; показатели химического загрязнения поверхностных вод. Приведены показатели изменений в воздушной и водной средах, земной поверхности, почвенно-растительном покрове и сопоставлены с их нормативными состояниями [4]. Выполнена оценка степени устойчивости ландшафтов бассейнов рек Яны, Индигирки и Колымы [5-7].

По результатам оценок степени воздействия, изменений в природной среде, устойчивости ландшафтов была составлена экологическая карта ландшафтных провинций арктической зоны бассейнов рек Яны, Индигирки и Колымы, по которой можно судить как о дальнейшей интенсификации использования исследуемого региона, так и о выборе направлений природоохранных мероприятий для снижения экологического воздействия энергоисточников Арктики.

Литература

1. Асеев А. Л., Лебедев М.П. О концепции Программы комплексных научных исследований в Республике Саха (Якутия) // Экономика Востока России. 2015. № 2(4). С. 9-11.
2. Основы ландшафтного анализа / В.С. Преображенский, Т.А. Александрова, Т. П. Куприянова. – М.: Наука, 1988. – 192 с.
3. Геоэкологические основы территориального проектирования и планирования / отв. ред. В.С. Преображенский, Т. Д. Александрова. М.: Наука, 1989. 114 с.
4. Государственный доклад о состоянии окружающей среды в Республике Саха (Якутия) в 2005-2019 гг. – [Электронный ресурс]. – minpriroda.sakha.gov.ru/doklad-ob...v...saha...za...
5. Шполянская Н.А., Зотова Л.И. Карта устойчивости ландшафтов криолитозоны Западной Сибири // Вестник МГУ. 1994. № 1. Сер. 5. География. С. 56-65.

6. Букс И. И. Некоторые методические вопросы определения потенциальной устойчивости природных комплексов в целях прогнозирования их состояния // Методология и методы географического прогнозирования. – М., 1983. – С. 104-113.
7. Мерзлотно-ландшафтная карта Республики Саха (Якутия). Масштаб 1: 1 500 000 / Федоров А. Н., Торговкин Я.И., Шестакова А. А., Васильев Н.Ф., Макаров В.С. и др.; гл. ред. М.Н. Железняк. 2018. 2 л.

ВІМ В ЭНЕРГЕТИКЕ

Рахлеев А. М.

Институт физико-технических проблем Севера им. В. П. Ларионова СО РАН
Якутск, Россия

Аннотация. Целью данной статьи является изучение эффективности использования BIM-технологий в проектировании энергоэффективных зданий с помощью программ для анализа производительности зданий Revit, Energy Plus и IES. В результате исследования доказано, что использование BIM-технологий снижает количество энергии, потребляемой зданием и стоимость строительства и обслуживания конструкции до 20%, таким образом, технология BIM позволяет субподрядчикам повышать энергоэффективность в процессе строительства.

Abstract. The purpose of this paper is to study the effectiveness of applying BIM technologies in the design of energy-efficient buildings using the programs for analyzing the buildings performance, Revit, Energy Plus and IES. As a result of the research, it is proved that the use of BIM technologies reduces the amount of energy consumed by a building and the cost of construction and maintenance of the structure by up to 20%, thus, BIM technology allows subcontractors to improve energy efficiency during the construction process.

В настоящее время во всем мире растет беспокойство по поводу последствий изменения климата и проблем нехватки ресурсов. Строительный сектор был определен как один из основных источников глобального воздействия на окружающую среду из-за его высокого энергопотребления [1, 2]. Потребление конечной энергии в зданиях наиболее сильно воздействует на окружающую среду в развитых странах [3], и на строительный сектор приходится около 40% общего потребления энергии и 38% выбросов углекислого газа CO₂ в США [4]. В связи с этим сокращение использования энергии с применением новых технологий, в частности, BIM-технологий (Building Information Modeling – информационная модель зданий и сооружений), становится актуальным сегодня.

Целью данной статьи является изучение эффективности использования BIM-технологий в проектировании энергоэффективных зданий с помощью двух ведущих программ для анализа производительности зданий – Revit, Energy Plus и IES. С экономической точки зрения показано, что использование технологии BIM снижает количество энергии, потребляемой зданием, а также стоимость строительства и обслуживания конструкции до 20%. Кроме того, может помочь субподрядчикам визуализировать строительный проект на каждом этапе строительного процесса. Технология BIM позволяет субподрядчикам повышать энергоэффективность в процессе строительства и является растущей тенденцией в отрасли из-за бесчисленных преимуществ, связанных с новой технологией.

Все еще остается вопрос, как обычные заинтересованные стороны в строительстве, могут выполнять анализ энергоэффективности, который ранее проводился преимущественно профессионалами, чтобы максимально повысить энергоэффективность здания. Чтобы решить эту проблему, мы сравнили эффективность и пригодность программ Energy Plus и IES в качестве инструментов моделирования энергопотребления на основе BIM.

IES VE и EnergyPlus являются наиболее часто используемыми инструментами для моделирования энергоснабжения по всему миру. IES VE более удобный с точки

зрения пользовательского интерфейса и отчетов. В IES VE проще определить параметры проекта. Он также может выполнять анализ вычислительной гидродинамики (CFD) и анализ стоимости жизненного цикла (LCA). EnergyPlus – это мощный инструмент моделирования энергопотребления, который предлагает пользователям отличную гибкость в определении систем HVAC и позволяет моделировать несколько систем HVAC для одной зоны.

В энергоэффективных зданиях часто используются различные меры по снижению энергопотребления – как энергии, необходимой для извлечения, обработки, транспортировки и установки строительных материалов, так и эксплуатационной энергии, то есть энергии, потребляемой во время фазы эксплуатации здания для предоставления необходимых услуг, например, обогрева, охлаждения и электроснабжение оборудования. Чтобы снизить тепловые аспекты потребления энергии на этапе эксплуатации, используются высокоэффективные окна и теплоизоляция в стенах, полах и полах, что повышает энергоэффективность здания. Сокращение использования конечной энергии должна быть главной задачей проектировщиков, которые хотят спроектировать и построить энергоэффективные здания.

Многие инженеры сходятся во мнении, что BIM-моделирование является самым точным инженерным инструментом, позволяющим выделить наиболее эффективные с энергетической точки зрения процессы [5,6]. Программные обеспечения, работающие по принципу BIM, позволяют определить степень энергоэффективности здания, а также выбрать наиболее рациональные и экономичные решения для сокращения расходов в процессе эксплуатации.

В России, проектирование энергоэффективных зданий с помощью BIM-технологий только набирает актуальность, и данной технологией обладают лишь немногие проектные компании. Тренды показывают, что строительная индустрия будет все больше и больше использовать BIM в этапах проектирования зданий для улучшения качества проектирования, повышения эффективности здания, особенно в отношении энергопотребления.

Литература

1. Junnila, S., and Horvath, A. (2003). "Life-cycle environmental effects of an office building." J. Infrastruct. Syst., V:9_4, pp: 157–166.
2. Zabalza Bribián I., Aranda Usón A., Scarpellini S. (2009). "Life cycle assessment in buildings: state-of-the-art and simplified LCA methodology as a complement for building certification". Build Environ, V:12, pp: 2510–2520.
3. Operational Energy Use-wikicommon language, http://www.sccommonlanguage.eu/index.php?title=Operational_Energy_Use
4. U.S. Energy Information Administration, Emissions of Greenhouse Gases in the United States, <http://www.eia.gov/environment/reports.cfm?t=176>.
5. Петров К.С., Кузьмина В. А., Федорова К. В. Проблемы внедрения программных комплексов на основе технологий информационного моделирования (bim-технологии). // Инженерный вестник Дона. 2017. №2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/N2y2017/4057.
6. Лапина О.А., Лапина А. П. Энергоэффективные технологии // Инженерный вестник Дона. 2015. №1. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1p2y2015/2849.

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ПУСКО-НАЛАДОЧНЫХ И ТЕПЛОВЫХ ИСПЫТАНИЙ ПИЛОТНОЙ КОГЕНЕРАЦИОННОЙ УСТАНОВКИ НА ОСНОВЕ ГАЗИФИКАЦИИ ТВЕРДОГО ОРГАНИЧЕСКОГО ТОПЛИВА

Страшников А. В.
Сибирский федеральный университет
Красноярск, Россия

Аннотация. Показана перспективная когенерационная газопоршневая электростанция на основе газификации твердого органического топлива. Представлена схема и конструкция пилотной (опытной) установки, результаты ее пуско-наладочных и тепловых испытаний, а также расчетные технико-экономические характеристики промышленного аналога.

Для решения задачи энергообеспечения потребителей децентрализованных районов субъектов РФ на кафедре ТЭС СФУ была создана пилотная (опытная) когенерационная энергетическая установка мощностью 5,5 кВт на основе газификации твердого органического топлива (Рис. 1) [1].

В процессе опытной эксплуатации для газификации были опробованы различные виды твердого органического топлива: ТБО, древесина, пеллеты, различные виды бурых и каменных углей.

В качестве газифицирующего агента при проведении натурных испытаний установки были использованы разные среды: воздух, паровоздушная смесь, кислород, парокислородная смесь [2].

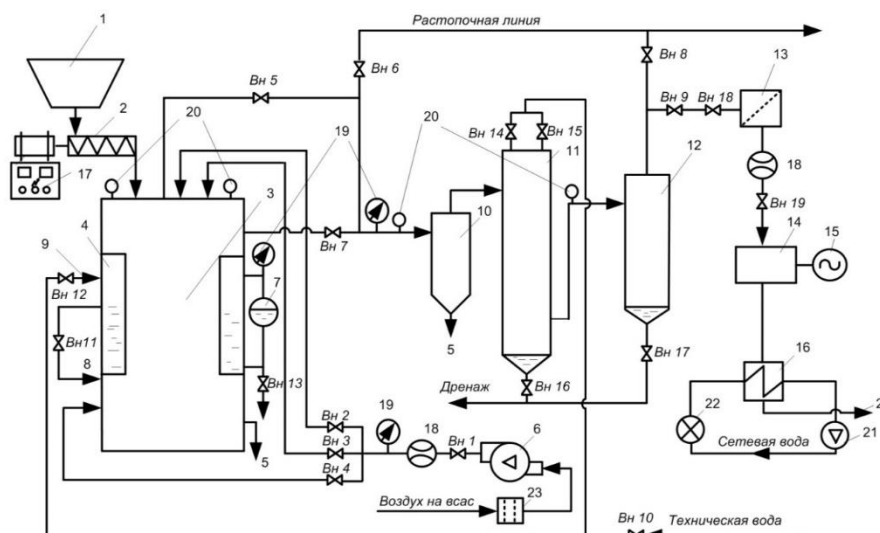


Рис. 1 – Принципиальная схема когенерационной энергетической установки с газификацией твердого органического топлива:

1 – бункер сырого угля; 2 – шнековый питатель; 3 – газогенератор; 4 – водяная рубашка; 5 – зольник; 6 – дутьевой вентилятор; 7 – водоуказательное стекло; 8 – линия впрыска пара; 9 – линия подачи воды в водяную рубашку газогенератора; 10 – фильтр-золоуловитель циклонный; 11 – мокрый скруббер; 12 – влагоотделитель; 13 – фильтр тонкой очистки газа; 14 – двигатель внутреннего сгорания; 15 – электрогенератор; 16 – теплообменный аппарат; 17 – щит управления; 18 – счетчик газа; 19 – манометр; 20 – датчик температуры; 21 – сетевой насос; 22 – теплофикационный потребитель; 23 – воздушный фильтр; 24 – выход отработавших газов

Генераторный газ полученный на воздушном дутье характеризуется пониженной теплотой сгорания Q_H^p (от 1228 кДж/м³ для твердых бытовых отходов до 2084 кДж/м³ для каменного угля) (Рис. 2).

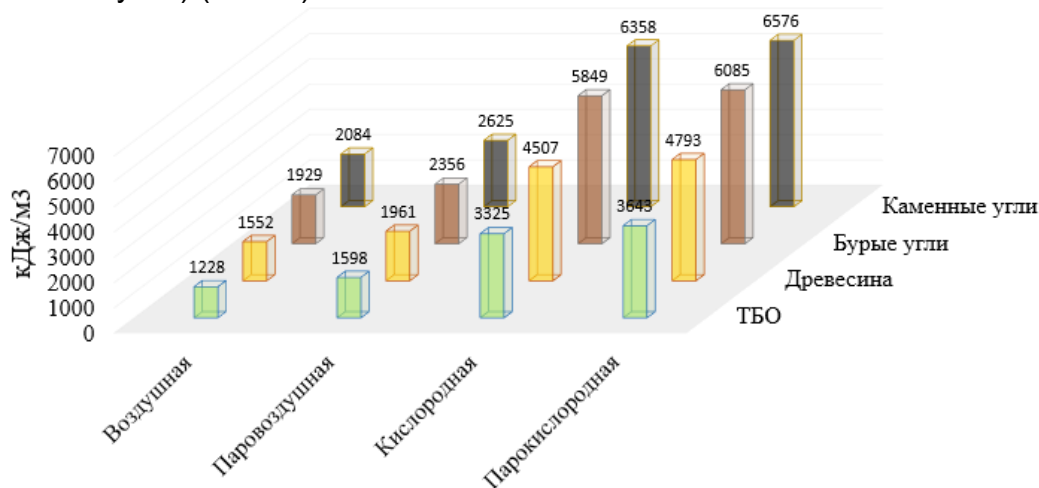


Рис. 2. Низшая теплота сгорания генераторного газа, Q_H^p

При добавлении насыщенного пара (10–15%) к воздушному дутью, при определенных условиях, удается получить более высокие значения теплоты сгорания генераторного газа (от 1598 кДж/м³ до 2625 кДж/м³) [3].

Генераторный газ полученный на кислородном дутье характеризуется более высокими значениями теплоты сгорания генераторного газа Q_n^p (от 3325 кДж/м³ до 6358 кДж/м³) [4].

Присадка пара к кислородному дутью приводит к повышению теплоты сгорания генераторного газа Q_n^p (от 3645 кДж/м³ до 6576 кДж/м³) [5].

Использование когенерационных энергоустановок на основе газификации местных твердых органических топлив позволяет существенно изменить топливно-энергетический баланс регионов РФ. Суммарный экономический эффект составит 75–197 млрд руб/год, из них 30 ÷ 57 млрд руб/год приходится на реализацию мероприятий по замещению ДЭС, 45 ÷ 140 млрд руб./год – эффект от замещения котельных. Для сравнения: общий среднегодовой объем инвестиций в централизованное теплоснабжение из бюджетов разных уровней составляет 10 – 15 млрд руб/год. Реализация мероприятия по замещению ДЭС и котельных когенерационными энергетическими установками позволит снизить тарифы на электроэнергию и тепловую энергию, провести техническое перевооружение существующих энергообъектов с внедрением новых технических и технологических решений [6].

Литература

1. Бойко Е.А., Страшников А. В. Когенерационная энергетическая установка на основе газификации твердого органического топлива для нужд малой распределенной энергетики. – Промышленная энергетика, 2020, №2, С. 34-43.
2. Копытов В. В. Пиролиз и перспективы газификации твердых топлив. – Промышленные и отопительные котельные и мини-ТЭЦ, 2011, №3(8), С.15-19.
3. Донской И.Г. Численное исследование режимов работы одноступенчатого поточного газогенератора с паровоздушным дутьем. – Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика», 2017, Т. 17, №3, С. 13-23.
4. Маляренко В. А., Яковлев А. И. Преобразование энергии твердого топлива в газовые и жидкие энергоносители. – Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит., 2010, №5(75), С. 36-47.
5. Загруднинов Р.Ш. Анализ работы газогенераторов Лурги при парокислородном и паровоздушном дутье / Р.Ш. Загруднинов, А. Н. Нагорнов, С.Н. Шитова, П.К. Сеначин // Всероссийский семинар кафедр вузов по теплофизике и теплоэнергетике: Тезисы докладов / Ин-т теплофизики им. С. С.Куталадзе СО РАН, Сибирский федеральный ун-т, г. Красноярск, 13-15 мая 2009 г.- Новосибирск: ИТ СО РАН, 2009.- С. 36.
6. Николаев Ю.Е., Мракин А. Н. Возможности создания энергокомплексов с газификацией топлива для энергообеспечения городов. – Промышленная энергетика, 2009, №9, С. 2-7.

ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ И ЛИМИТИРУЮЩИЕ ФАКТОРЫ НА ЭТАПАХ БИОРЕМЕДИАЦИИ НЕФТЕЗАГРЯЗНЕННЫХ ЗЕМЕЛЬ В УСЛОВИЯХ КРИОЛИТОЗОНЫ

ENVIRONMENTAL PROBLEMS AND LIMITING FACTORS AT THE STAGES OF BIOREMEDIATION OF OIL-POLLUTED LANDS IN THE CONDITIONS OF THE CRYOLITHOZONE

Ерофеевская Л. А.

Институт проблем нефти и газа СО РАН
Якутск, Россия

Аннотация. Исследовано экологическое состояние почв территории нефтебазы, расположенной в Центральной Якутии. Установлено, что через 10 лет после аварийного разлива нефти, в процессе самоочищения, почвы недостаточно очистились от углеводород-

ного загрязнения, обладают токсичностью по отношению к почвенной микрофлоре и высшим растениям. В качестве лимитирующих факторов на этапах биоремедиации установлены: трансформация нефтезагрязнений, климатические условия региона, недостаточная активность аборигенных углеводородоокисляющих микроорганизмов.

Abstract. The ecological state of the soils of the territory of the oil depot located in Central Yakutia is studied. It was found that 10 years after the emergency oil spill, in the process of self-cleaning, the soils were not sufficiently cleared of hydrocarbon pollution, and they are toxic to the soil microflora and higher plants. The following factors were identified as limiting factors at the stages of bioremediation: transformation of oil pollution, climatic conditions of the region, insufficient activity of native hydrocarbon-oxidizing microorganisms.

В настоящее время загрязнение природной среды нефтепродуктами является одной из актуальных экологических проблем. Влияние нефтяного загрязнения на свойства почвы связано с обволакиванием нефтью почвенных частиц, что приводит к нарушению водного и воздушного режимов почвы. В результате в почвогрунтах увеличивается количество углерода. Нарушается почвенный гомеостаз. Развивается токсикоз и дисбактериоз почв. Гибнет растительный покров.

Несвоевременная ликвидация нефтезагрязнений приводит к тому, что нефтяные углеводороды распространяются на сопредельные территории, земли на долгие годы выводятся из сельскохозяйственного оборота.

С целью изучения процессов самовосстановления почвенной экосистемы после аварийного разлива нефти, который случился 10 лет назад, проведены исследования почв и грунтов территории нефтебазы, расположенной в Центральной части Якутии на агрохимические и микробиологические показатели.

Материалом для исследований служили условно-чистые и нефтезагрязненные почвы.

Образцы для исследований отобраны в соответствии с ГОСТ [1; 2].

Биотестирование почвенных образцов на фитотоксичность проведено с использованием стандартной методики [3].

Для описания морфологических признаков почв были заложены по два почвенных разреза на загрязненном нефтью участке и в удалении от нефтезагрязненного объекта на 500 и 1000 м.

Разрезы №1 (N 60°54'113", E 132°03'434") и №2 (N 60°54'186", E 132°02'754") заложены на участке с пологим рельефом, правильной четырёхугольной формы. Проективное покрытие, составляло 85-90%. Растительный покров на участке состоял главным образом из мятлика лугового (*Poa pratensis*), тимopheевки луговой (*Phléum pratense*) и полыни обыкновенной (*Artemisia vulgaris*).

Почвы на нефтезагрязненном участке уплотнены. Структура клейкая. Верхний слой почв покрыт белым соевым налетом. На горизонте 0-20 см профиль буровато-серый, тяжелосуглинистый, слегка влажный, корневые волоски отсутствуют. Реакция почвенной среды щелочная. Профиль на глубине 20-40 см и ниже – песчано-гравийный, слегка влажный. Реакция почвенной среды щелочная.

Для исследованных почвенных образцов характерны: слабая и средняя степени засоленности, недостаточная влагообеспеченность, недостаток содержания азота-нитратов (N-NO₃), подвижного фосфора (P₂O₅), подвижных форм калия (K₂O) и азота-аммония (N-NH₄). По обеспеченности гумусом почвы отнесены к среднегумусовому типу.

Методом биотестирования установлено, что почвы на нефтезагрязненном участке фитотоксичны. В опытах с семенами районированного сорта пшеницы «Приленская-19» всхожесть семян в загрязненных почвенных образцах составила 0–44%, тогда как в условно-чистых образцах этот показатель соответствовал 80–96%.

Установлено, что на фоне сравнительно высокой общей численности микроорганизмов (от 1 миллиона до 10 миллиардов клеток на 1 грамм сухой почвы) в почвенных образцах, отобранных с нефтезагрязненного участка, обеднено их видовое разнообразие, в сравнении с чистыми почвами.

Основная роль в микробных комплексах почвенной экосистемы, загрязненной нефтью, принадлежит пигментообразующим микроорганизмам. Из почвогрунтов выделены и идентифицированы спорообразующие бактерии рода *Bacillus*, неферментирующие бактерии рода *Pseudomonas*, дрожжеподобные грибы рода *Candida*, микроскопические грибы родов *Aspergillus*, *Penicillium* и *Fusarium*.

Почвы имеют следы застарелого загрязнения. Опробование почвенным буром показало, что на территории нефтебазы имеются локальные нефтезагрязненные участки засыпанные песком.

Таким образом, полученные результаты свидетельствуют об экологической напряженности почв нефтебазы. Признаками экологической напряженности служат: изменения физико-химических свойств почвы: образование глыбистости почвенной структуры, гидрофобность, засоленность, высокие значения pH, недостаток подвижного фосфора, азота нитратов и азота аммиака.

Установлено, что в процессе самоочищения, почва недостаточно очистилась от углеводородного загрязнения и обладает фитотоксичностью и токсичностью к почвенным микроорганизмам.

Лимитирующими факторами, влияющими на полноценное развитие растений и активности почвенной микрофлоры на исследуемом участке нефтебазы, являются: тяжелый гранулометрический состав почвы, нарушение водного и воздушного режимов, токсическое действие компонентов окисленной нефти, трансформация нефтезагрязнений, захороненных под слоем песка, климатические условия региона, недостаточная активность аборигенных углеводородоокисляющих микроорганизмов. Всё это обуславливает необходимость разработки технологий биорекультивации почв, направленных одновременно на решение проблемы рассоления почвы, корректировки минеральных компонентов, стимулирования процессов микробиологической очистки почвы от нефти.

Работа выполнена в рамках проектов № 18-45-140009 p_a и № 0297-2021-0002.

Литература

1. ГОСТ 17...01-2017. Охрана природы. Почвы. Общие требования к отбору проб.
2. ГОСТ 17...02-2017 Охрана природы. Почвы. Методы отбора и подготовки проб для химического, бактериологического, гельминтологического анализа.
3. ГОСТ Р ИСО 22030-2009. Качество почвы. Биологические методы. Хроническая фитотоксичность в отношении высших растений.

ОСОБЕННОСТИ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ АЛМАЗОВ РАЗНЫХ ФИЗИЧЕСКИХ ТИПОВ

Бескрованов В. В.

Северо-Восточный федеральный университет имени М. К. Аммосова
г. Якутск, Россия

По результатам собственных исследований и литературным сведениям проанализированы особенности теплопроводности алмазов разного физического типа. Особую ценность имеют образцы типа IIa. Ювелирные характеристики у основной массы алмазов типа II характеризуется низкими качествами. В противоположность алмазам распространенного размера крупные алмазы часто относятся также к типу II. Ответ на вопрос в чем заключается механизм различия ювелирных свойств крупных и обычных

алмазов типа II остается открытым. Подвергнут сомнению укоренившийся вывод об азотной природе дефектов центра А.

Теплопроводность одна из главнейших физических характеристик алмаза, позволяющих использовать его в наукоемких отраслях промышленности в качестве теплопроводов. Коэффициент теплопроводности алмазов типа IIa (20–25 Вт/см·К) превосходит этот показатель для алмазов типа Ia (не выше 7–14 Вт/см·К). По этому поводу существует предположение, что это связано с рассеянием фононов примесями и структурными дефектами алмаза. Мы предлагаем авторское объяснение разницы теплопроводности алмазов разных типов.

Нами установлено, что и среди алмазов типа IIa обособляется группа кристаллов, отличающаяся от основной массы наличием специфической оранжевой фотолюминесценции. Все эти кристаллы обнаружили характеристические признаки алмазов типа IIa. Они не имели поглощения в однофононной части ИК-спектра и были прозрачны вплоть до $\lambda \leq 225$ нм. В спектре фотолюминесценции отсутствует система N3 и наблюдается ряд узких резких электронных линий и фононных полос: 503,4 и 510,7 (система S1); 507,8; 497,8; ; 511,8; 569,9; 573,2; 576,0; 578,4; 581,8; 587,7; 591,5; 598,0; 604,2 нм.

СПОСОБ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СРЕДНЕЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ОДНОТИПНЫХ ОБЪЕКТОВ ИЛИ ОБЪЕКТА С РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ

Афанасьев Д. Е., Ли-Фир-Су Р. П.

Институт физико-технических проблем Севера им. В. П. Ларионова СО РАН,
Якутск, Россия

Аннотация. Известные способы определения средней температуры объектов (объекта) в системах централизованного контроля и регулирования (многоточечные регуляторы) температуры большого числа объектов достаточно сложны технически из-за своей ресурсоемкости и малоэффективны в режимном отношении из-за дискретности во времени. Предлагается простой в техническом исполнении, низкоресурсоемкий способ получения непрерывной информации о средней температуре однотипных объектов или объекта с распределенными параметрами.

Abstract. Known methods for determining the average temperature of objects (object) in systems of centralized control and regulation (multi-point controllers) of the temperature of a large number of objects are technically rather complicated due to their resource intensity and are ineffective in terms of operation due to discreteness in time. A technically simple, low-resource-intensive method is proposed for obtaining continuous information about the average temperature of objects of the same type or an object with distributed parameters.

В системах централизованного контроля и регулирования температуры однотипных объектов или объекта с распределенными параметрами известен способ определения средней температуры, включающий последовательный обегаящий опрос показаний датчиков–термосопротивлений, запоминания на каждой ступени опроса измеренной температуры, суммирование данных и деление полученной суммы на число датчиков. Наличие в известном способе операций последовательного опрашивания датчиков, запоминания измеренной температуры на каждой ступени опроса, их суммирования и деления полученной суммы на число датчиков существенно усложняет схему системы измерения.

Предлагаемый способ [1] определения средней температуры не имеет этих недостатков и осуществляется без разделения во времени операций опрашивания, запоминания, суммирования и деления, а автоматически выполняя эти операции как

единое целое и постоянно обеспечивая устройство сравнения непрерывной во времени информацией о средней температуре однотипных объектов или объекта с распределенными параметрами.

Объединяя процессы измерения, суммирования, деления показаний большого количества датчиков и выдавая результат в виде измеренной средней температуры в разных объектах (точках) такой многоплечий уравновешенный мост, по существу, является развертывающим-свертывающим устройством между объектом исследования и органом сравнения без коммутации тока, что существенно упрощает систему контроля за температурным режимом объектов (объекта), повышает ее надежность и эффективность.

Повышение точности определения средней температуры достигается увеличением общего числа датчиков, количество, порядок включения каждого из которых в схему уравновешенного моста термосопротивлений соответствует принципу построения квадратной матрицы (рис. 1).

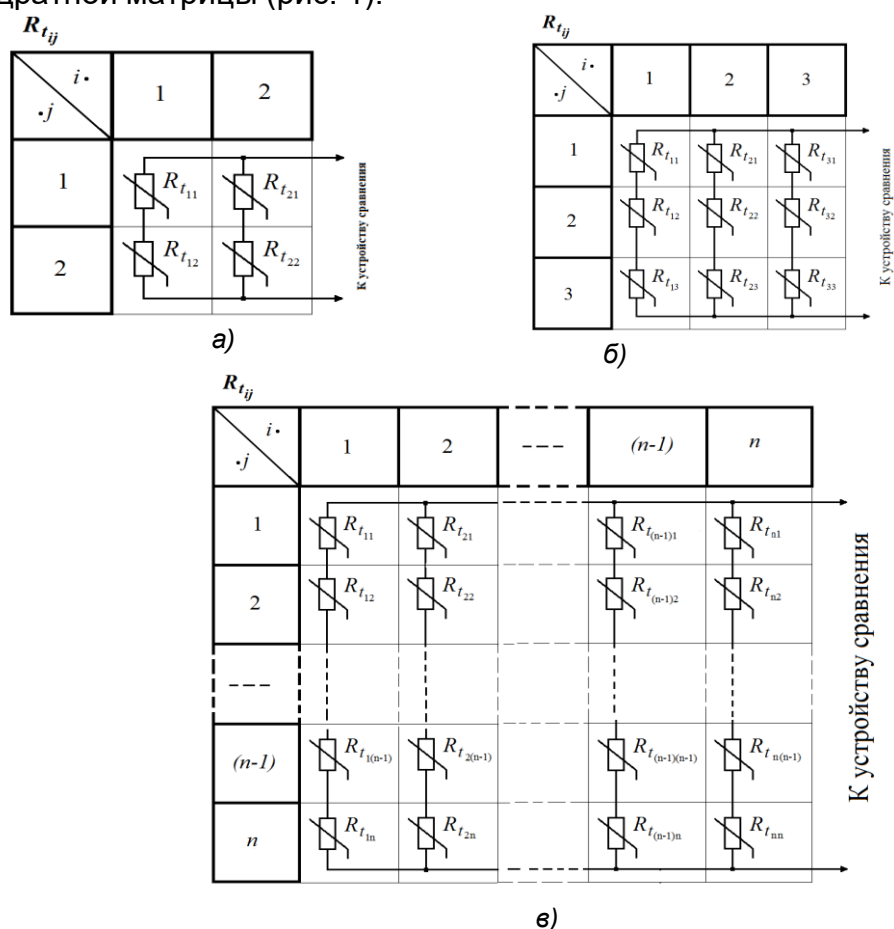


Рис. 1. Схема измерения средней температуры однотипных объектов или объекта с распределенными параметрами: а) 4-х однотипных объектов (4-х точек объекта с распределенными параметрами); б) 9-ти объектов (9-ти точек); в) n объектов (n точек)

Закключение. Непосредственное определение средней температуры датчиков (измерение температур в разных точках, суммирование измеренных температур, деление полученной суммы на число датчиков и выдача результата в виде величины средней температуры объектов (объекта)) осуществляется развертывающим-свертывающим устройством, представляющим собой многоплечий уравновешенный мост из соединенных между собой последовательно–параллельно датчиков–термосопротивлений, два выхода которого подключены к входам устройства сравнения (рис. 1).

Для повышения точности определения средней температуры объектов (объекта) увеличение числа датчиков в системе осуществляется согласно принципу построения квадратной матрицы, у которой число столбцов (число плеч моста) равно числу ее

строк (число последовательно соединенных термосопротивлений в каждом из плеч моста, то есть числу групп однотипных объектов или зон объекта с распределенными параметрами).

Литература

1. Афанасьев Д.Е., Седалищев В. А., Васильев П. Ф., Ли-Фир-Су Р.П., Афанасьев А.Д. Способ определения средней температуры однотипных объектов или объекта с распределенными параметрами. Патент РФ № 2691750. – 2019.

УСТРОЙСТВО ДЛЯ ЛИКВИДАЦИИ ГИДРАТНЫХ И ПАРАФИНОВЫХ ОТЛОЖЕНИЙ В НЕФТЯНЫХ СКВАЖИНАХ

Кобылин В. П., Ли-Фир-Су Р. П.

ФГБУН Институт физико-технических проблем Севера им. В. П. Ларионова СО РАН, Якутск, Россия

Аннотация. Внедрение новых технологий и проведение различных мероприятий, направленных на снижение влияния осложняющих факторов, являются одной из важных составляющих процесса оптимизации режимов работы нефтедобывающих скважин в нефтегазовых регионах Западной Сибири и Крайнего Севера, особенно по предупреждению образования асфальтеносмолопарафиновых отложений (АСПО) при эксплуатации добывающих скважин. Нами предлагается устройство для ликвидации гидратных и парафиновых отложений в нефтяных скважинах.

Abstract. The introduction of new technologies and the implementation of various measures aimed at reducing the impact of complicating factors are one of the important components of the process of optimizing the operating modes of oil wells in the oil and gas regions of Western Siberia and the Far North, especially to prevent the formation of asphaltene-tar-paraffin deposits during the operation of production wells. We propose a device for the elimination of hydrate and paraffin deposits in oil wells.

Образование АСПО – наиболее распространенный на нефтяных месторождениях вид осложнений при эксплуатации добывающих скважин. Отложения на поверхностях скважинного оборудования представляют собой сложную смесь со значительным содержанием асфальтеносмолопарафиновых веществ (АСПВ), масел, воды и механических примесей. Состав отложений зависит от природы нефти, от места локализации АСПО и от термодинамических условий, при которых происходит эксплуатация скважин.

Промышленное освоение крупнейших нефтяных месторождений Западной Сибири и Крайнего Севера требуют решения ряда сложных проблем, связанных со специфическими условиями их эксплуатации. Большая глубина залегания продуктивных горизонтов, наличие многолетнемерзлых горных пород, высокий газовый фактор и повышенное содержание асфальтеносмолопарафиновых веществ в нефти является причиной образования твердых отложений, перекрывающих насосно-компрессорные трубы (НКТ) в добывающих скважинах. Существенные осложнения при этом вносятся в эксплуатацию скважин, оборудованных штанговыми насосами из-за невозможности удаления АСПО из НКТ при одновременном запарафинивании затрубного пространства. Твердые отложения в НКТ доходят до глубины 600 и более метров в зависимости от условий эксплуатации скважин. Вышеназванные отложения в основном состоят из парафина, смол, асфальтенов, мехпримесей и воды, которые препятствуют дальнейшей эксплуатации скважины и извлечению колонны штанг в период текущего или капитального ремонта. Следует отметить, что продолжительность и стоимость ремонта таких скважин чрезвычайно высоки из-за невозможности горячей промывки скважин через затрубное пространство [1].

Продолжительный простой скважины вследствие охлаждения околоствольной части и промерзания труб в зоне реликтовой мерзлоты в значительной мере усугубляет осложнения и делает невозможным проведение ремонта простаивающих скважин и, как следствие, скважины переводятся в категорию бездействующих.

Следовательно, первостепенными в нефтедобыче являются проблемы обеспечения безаварийной эксплуатации скважин в районах Крайнего Севера, что и определяет актуальность создания эффективных технологий в решении вопросов предупреждения образования и удаления отложений АСПВ.

Нами разработано устройство для ликвидации гидратных и парафиновых образований в скважинах [2] (рис. 1, 2), включающее электронагреватель на многожильном кабеле, подключенный к источнику питания и имеющий возможность спуска в скважину до верхней границы гидратных и парафиновых образований, перевода их в расплавленное состояние и продвижения в скважине.



Рис. 1

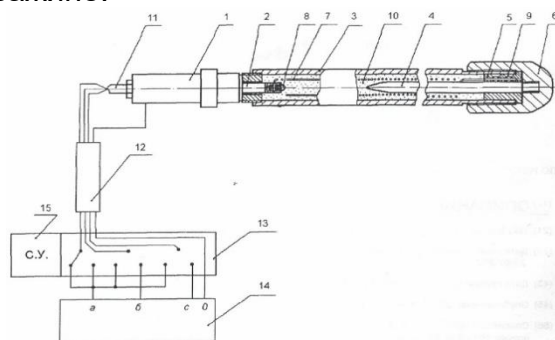


Рис. 2

Устройство (рис. 2) снабжено электронагревательной спиралью 7, медным концентратором плавления гидратных и парафиновых образований 6 с медным стержнем 4, расположенным внутри электронагревательной спирали, и устройством для автоматического периодического переключения 13 жил кабеля 11 с однофазного на трехфазное питание с выдержкой во времени.

Результат. При использовании данного устройства достигается повышение скорости проходки гидратных и парафиновых отложений при одновременном исключении аварийных прихваток кабеля.

Литература

1. Рагулин В. В., Смолянец Е. Ф., Михайлов А. Г. и др. Исследование свойств асфальтосмолопарафиновых отложений и разработка мероприятий по их удалению из нефтепромысловых коллекторов // Нефтепромысловое дело - 2001. - №5. - С. 33-36.
2. Кобылин В. П., Львова З. М., Седалищев В. А., Ли-Фир-Су Р. П., Кобылин С. В. Патент РФ № 2303127. Оpubл. 20.07.2007 г. – Бюл. № 20.

ТЕНДЕНЦИИ И ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РЕСУРСОВ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УГЛЕЙ РЕСПУБЛИКИ САХА (ЯКУТИЯ)

Павлов Н. В.¹, Такайшвили Л. Н.²

¹ Институт физико-технических проблем Севера им. В. П. Ларионова СО РАН
г. Якутск, Россия

² Институт систем энергетики им. Л. А. Мелентьева СО РАН
г. Иркутск, Россия

Аннотация. Исследования проведены с использованием методов системного анализа. При анализе балансовых запасов углей выделены угли экспортного значения, угли пригодные для нужд коксохимии и энергетики, в том числе угли пригодные для

использования только на месте добычи. Рассмотрены тенденции поставок и потребления углей республики. Доступные ресурсы энергетических углей значительно превышают их востребованность как в настоящее время, так на перспективу.

Abstract. The research was carried out using the methods of systems analysis. When analyzing the balance reserves of coal, export value coals were identified, coals suitable for the needs of the coke industry and power generation, including coals suitable for use only at the mining site. The tendencies of supply and consumption of coal in the republic are considered. Available resources of steam coal is much higher than the demand for them as it is now, so in the future.

Республика Саха (Якутия) как самый крупный по площади регион Российской Федерации занимает 18% ее территории, при населении 984,7 тыс. чел. Основная особенность республики это наличие территорий отнесенных к Арктической зоне Российской Федерации и Дальнего Востока, на которые приходится 52,2% площади Республики и где проживает 7% населения. Снабжение населения и объектов промышленности электро и теплоэнергией является жизненно важным. В Республике Саха (Якутия) имеются значительные запасы энергоресурсов: гидроресурсы, уголь, нефть, газ. Гидроресурсы, уголь и газ являются основными ресурсами для выработки электро и теплоэнергии в республике. Благодаря высокой обеспеченности запасами уголь является надёжным и одним из основных источников топлива на длительную перспективу в республике.

Отличительной чертой энергосистемы республики является наличие зоны централизованного (36% территории) и децентрализованного (74% территории) энергоснабжения. К зоне децентрализованного энергоснабжения относятся территории арктических и северных районов республики, где проживает 15% населения. До присоединения в состав Единой энергосистемы России в 2019 году отдельные энергорайоны характеризовались избыточным балансом энергии и электрической мощности в силу их изолированности.

Основными видами топлива, потребляемыми на электростанциях и в котельных республики, являются уголь и природный газ. Приблизительная доля угля в общем потреблении на электростанциях республики составляет 50%, а котельных – 40%. Доля природного и попутного газа в потреблении топлива на электростанциях и котельных составляет примерно по 45%. В небольших объемах потребляется дизельное топливо, в основном – на электростанциях, и древесина – в котельных. Объекты угольной энергетики играют замыкающую роль в удовлетворении спроса на электроэнергию и тепло.

Ресурсы угля для развития угольной энергетики значительно превышают их востребованность [1].

Развитие энергетики Республики Саха (Якутия) должно быть направлено на устранение энергодефицитных территорий как с большим потенциалом промышленного развития, так и изолированных районов с возможностью использования местной сырьевой базы.

Использование ресурсов энергетических углей на электростанциях республики и соседних регионов продолжает быть коммерчески эффективным не только в настоящее время, но будет выгодно и в перспективе, особенно с учетом необходимости использовать низкосортные продукты переработки высококачественных углей [2, 3].

По разным причинам "угольная" генерация еще длительное время будет актуальна. Особенно актуально это для изолированных районов республики, располагающих запасами местных углей и испытывающих потребность в источниках электро- и теплоэнергии. Важное значение имеет возможность и перспективность не только разработки и внедрения эффективных технологий в угольной энергетике, но и учет региональных особенностей. Проблема разработки современных технологий широко обсуждается в работах российских и зарубежных исследователей. Одна из наиболее серьезных проблем связана со сжиганием низкокачественных энергетических углей

[4]. Что касается местных углей, то низкое качество их связано с недообследованностью месторождений и колебанием качественных характеристик в пределах одного месторождения [5].

Рассматривая возможности их использования для энергетики ресурсов якутских углей, можно сформировать возможный коридор их вовлечения в энергетический баланс без привязки к периодам времени.

Минимальный объем потребления ресурсов якутских энергетических углей подразумевает сохранение существующих мощностей угольных электростанций, и поставок в соседние регионы, возможный переход отдельных энергоисточников, в первую очередь котельных на газ и реализацию энергоемких проектов развития промышленности.

Максимально возможный объем потребления ресурсов энергетических углей республики включает сооружение ТЭС для экспорта электроэнергии. При сохранении действующих объектов энергетики в перспективе возможен умеренный рост спроса на электро- и теплоэнергию за счет реализации проектов улучшения энергоснабжения прочих потребителей изолированных районов.

В ближайшей перспективе до 2025 г. ожидается прирост спроса на электрическую энергию на 20% и тепловую энергию в республике на 8%. При этом ожидаемый рост потребления угля на электростанциях республики с 1,5 млн. т у.т. до 1,9 млн. т у.т. в год., рост потребления угля на котельных с 2,4 млн. т у.т. до 2,9 млн. т у.т. [6].

Рост спроса на электро- и теплоэнергию угольных ТЭС в Республике Саха (Якутия) возможен благодаря развитию горнодобывающей промышленности, строительства новых жилых комплексов и развития энергообеспечения населения республики. Реализация проектов по строительству электростанций на угле для экспорта электроэнергии в ближайшей перспективе маловероятна. Экологические и экономические аспекты широкомасштабного развития угледобычи и экспорта электроэнергии требуют основательной проработки.

Литература

1. Прогнозные ресурсы твердых и твердых горючих (Уголь) полезных ископаемых Российской Федерации на 1 января, 2019 года. Выпуск 4. Уголь – М.: Министерство природных ресурсов и экологии Российской Федерации, Федеральное агентство по недропользованию. – 80 с.
2. Тумановский Ф.Г. Перспективы развития угольных ТЭС России// Теплоэнергетика. 2017. № 6. С. 3–13.<http://doi.org/10.1134/S004036361706008X>
3. Макаров А. А., Веселов Ф.В., Макарова А. С., Урванцева Л.В. Комплексная оценка технологической трансформации электроэнергетики России// Теплоэнергетика. 2019. № 10. С. 3–18. <http://doi.org/10.1134/S0040363619100047>
4. Mills S. Low quality coals – key commercial, environmental and plant considerations // IEA Clean Coal Centre. 2016. [Электронный ресурс]. URL: <https://usea.org/sites/default/files/Low%20quality%20coals%20-%20key%20commercial%2C%20environmental%20and%20plant%20considerations%20-ccc270.pdf>(07.06.2021).].
5. Хютанов Е.А., Гаврилов В.Л. Моделирование угольных месторождений заполярной зоны Якутии // Проблемы недропользования. – 2017. – №4. С.53-60.
6. Указ Главы Республики Саха (Якутия) от 29 апреля 2021 года № 1840. О схеме и программе развития электроэнергетики Республики Саха (Якутия) на 2021-2025 годы.

ПРОТЯЖЁННЫЕ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ С РАССРЕДОТОЧЕННЫМИ МАЛЫМИ НАГРУЗКАМИ

Давыдов Г. И., Ли-Фир-Су Р. П., Кобылин В. П.

Институт физико-технических проблем Севера им. В. П. Ларионова СО РАН
г. Якутск, Российская Федерация

Аннотация. Анализ возможных методов регулирования напряжения в энергосистемах показывает, что к наиболее эффективным для протяженных воздушных линий следует отнести метод регулирования по току. Реализация этого метода осуществля-

ется компенсирующими устройствами реактивной мощности, трансформаторами, регулируемые под нагрузкой, или вольтдобавочными. Последние позволяют за счет введения сравнительно небольших дополнительных мощностей с регулирующими органами на тиристорных ключах решить задачу поддержания напряжения на протяженных воздушных линиях в допустимых пределах.

Abstract. Analysis of possible methods of voltage regulation in power systems shows that the current control method should be referred to as the most effective for long-distance overhead lines. The implementation of this method is conducted by reactive power compensation devices, transformers with on-load tap changing, or voltage boosters. The latter allow solving the problem of maintaining the voltage on long-distance overhead lines within acceptable limits, owing to the introduction of relatively small extra power with final control elements on thyristor keys.

Передача электрической энергии на большие расстояния по протяженным линиям электропередачи с рассредоточенными малыми нагрузками – одна из трудоемких технических задач в плане обеспечения необходимой пропускной способности воздушной линии при удовлетворительных качественных и экономических показателях электропередачи.

Целью работы является разработка метода и средств для реализации и нормального функционирования протяженной электропередачи с рассредоточенными малыми нагрузками на основе силовоточной электроники. В работе поставлены задачи повышения пропускной способности протяженных воздушных линий электропередачи и увеличение управляемости и устойчивости энергосистем, а также улучшения качества электроэнергии при передаче на дальние расстояния в заниженном классе напряжений. Существующими средствами и методами эти проблемы решают не в полной мере и не всегда оптимально.

В последние годы учёных, исследующих надёжность энергосистем в нашей стране и за рубежом, интересуют также вопросы управляемости энергосистем. Прежде всего, это обусловлено децентрализацией управления отдельных энергообъединений, требующих повышения гибкости их работы, а также нового поколения регулирующих устройств, базирующихся главным образом на силовоточной преобразовательной технике. Началом исследований следует считать 1986 г., когда американский учёный Н. Хингорани предложил концепцию развития гибких передающих систем переменного тока (FACTS) [1], смысл которой заключается в том, что достижения в области силовоточной электроники позволяют использовать её не только в цепях постоянного тока, но и широко внедрять в устройствах переменного тока для стабилизации напряжения, демпфирования низкочастотных колебаний, повышения управляемости, статической и динамической устойчивости энергосистем, оптимизации потокораспределения, повышения пропускной способности линий и снижения потерь. Первоначально к устройствам системы FACTS были отнесены только полностью управляемые вентильные устройства, но затем это понятие было распространено на устройства продольной компенсации традиционного типа и тиристорно-реакторные группы, СТАТКОМ, вставки постоянного тока и на электромеханические преобразователи частоты на базе асинхронизированных машин. Таким образом, данная система включает совокупность всех устройств стабилизации напряжения, снижения потерь, повышения устойчивости и оптимизации потокораспределения в системах передачи электроэнергии.

Основная идея управляемых электропередач переменного тока повышенной пропускной способности состоит в том, чтобы создать воздушные линии электропередачи с заданной величиной пропускной способности, обеспечивающие в процессе ра-

боты режимные характеристики, отвечающие всем нормативным требованиям, заданным показателям качества, экономичности и надёжности передачи и распределения электрической энергии.

Применение традиционных средств повышения качества электроэнергии желаемого результата не даёт. Недостатки традиционно используемых средств обеспечения качества электроэнергии на основе компенсирующих устройств инициируют освоение одного из наиболее эффективных специализированных устройств управления параметром напряжения – регулятора-стабилизатора напряжения на основе элементов силовоточной преобразовательной техники.

Вопросами развития и совершенствования методов регулирования и стабилизации напряжения занимаются многие разработчики и научные сообщества [2–8], которые достигли определенных успехов в узкодиапазонном регулировании и стабилизации переменного напряжения с помощью тиристорных ключей.

Наряду с достигнутыми успехами следует отметить, что при исследовании вопросов стабилизации напряжения протяжённых воздушных линий существует ещё много нерешённых задач, касающихся методов построения высоковольтных регулирующих органов на тиристорах, которые позволили бы получить минимальные искажения формы кривой выходного напряжения и использовать устройства стабилизации для повышения уровней статической и динамической устойчивости энергосистемы.

Анализ возможных методов регулирования напряжения в энергосистемах показывает, что к наиболее эффективным для протяжённых воздушных линий следует отнести метод регулирования по току. Реализация данного метода осуществляется компенсирующими устройствами реактивной мощности, трансформаторами, регулируемые под нагрузкой, или вольтодобавочными. Последние позволяют за счёт введения сравнительно небольших дополнительных мощностей с регулирующими органами на тиристорных ключах решить задачу поддержания напряжения на протяжённых воздушных линиях в допустимых пределах.

Существуют два метода возбуждения вольтодобавочного трансформатора. Первый основан на изменении насыщения сердечника путём подмагничивания постоянным током, второй – на традиционной конструкции вольтодобавочного трансформатора, у которого в возбуждающую обмотку включены силовые трансформаторы. Именно этот метод представляет интерес для узкодиапазонного регулирования. Он реализует чередование трёх режимов, зависящих от условий нагрузки: режим вольтодобавки, режим нулевой добавки и режим вольтоотбавки. На этом принципе построен регулятор-стабилизатор напряжения тиристорной системы, разработанный в Институте физико-технических проблем Севера им. В. П. Ларионова СО РАН.

Гибкие системы передачи электрической энергии являются перспективным направлением передачи и распределения электрической энергии. С повышением доли возобновляемых источников энергии в системе распределённой генерации в условиях протяжённых электропередач и рассредоточенной малой нагрузки данные системы смогут расширить возможности существующих электрических сетей и стать основой для интеллектуальных систем управления и учёта перетоков электрической энергии и мощности.

Литература

1. Frank Young, Robert Iveson, Narain Hingorani. Network Access and the Future of Power Transmission // EPRI JOURNAL. 1986, vol. 11, №3, pp. 4–13.
2. The unified power-flow controller – a new approach to power transmission control / L. Gyugyi, C.D. Schauder, S.L. Williamson et al. // IEEE Transactions on Power Delivery. 1995, vol. 10, No2, pp. 1085–1097 (DOI: 10.1109/61.00878)
3. Reactive power compensation technologies: State-of-the-art review / J.Dixon, L.Moran, J.Rodriguez, R. Domke // Proceedings of the IEEE. 2005, vol. 93, No12, pp. 2144–2164 (DOI: 10.1109/JPROC.2005.859937).

4. Power flow control by unified power flow controller / Khan Muhammad Yousaf Ali, Khalil Umayret al. // Engineering Technology & Applied Science Research. 2019, vol. 9, is.2, pp. 3900–3904.
5. Kamarposhti Mehrdad Ahmadi, Lesani Hamid. Effects of STATCOM, TCSC, SSSC and UPFC on static voltage stability // Electrical Engineering. 2011, vol. 93, is.1, pp. 33–42 (DOI: 10.1007/s00202-010-0187-x).
6. Sode-Yome A, Mithulanathan N. Comparison of shunt capacitor, SVC and STATCOM in static voltage stability margin enhancement // International Journal of Electrical Education. 2004, vol. 41, is.2, pp. 158–171 (DOI: 10.7227/IJEEE.1.2.7).
7. A distributed static series compensator system for realizing active power flow control on existing power lines / D.M. Divan, W.E. Brumsickle, R.S. Schneider et al. // IEEE Transactions on Power Delivery. 2007, vol. 22, is.1, pp. 642–649 (DOI: 10.1109/TPWRD.2006.887103).
8. Abido M.A. Pole placement technique for PSS and TCSC-based stabilizer design using annealing // International Transactions on Electrical Energy Systems. 2000, vol. 22, is.8, pp. 543–554 (DOI: 10.1016/S0142-0615(00)00027-2).

ПРИМЕНЕНИЕ ОПТИМИЗАЦИОННЫХ МЕТОДОВ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЯХ 10/0,4 КВ

Хоютанов А. М., Васильев П. Ф., Давыдов Г. И.
ИФТПС СО РАН
Якутск, Россия

Аннотация. В данной статье рассмотрено применение методов оптимизации в сельских распределительных сетях 10/0,4 кВ для уменьшения потерь активной мощности и повышения качества электрической энергии.

Abstract. This article discusses the application of optimization methods in rural distribution networks of 10 / 0. kV to reduce active power losses and improve the quality of electrical energy.

Электроснабжение сельских поселений Республики Саха (Якутия) осуществляется в основном от секций шин 10 кВ понижающих подстанций, подводящих электрическую энергию к районным центрам муниципальных образований. Данные электропередачи характеризуются большой протяженностью воздушных линий (ВЛ) 10 и 0,4 кВ, перегрузкой трансформаторных подстанций 10/0,4 кВ внутри районных центров, недогрузкой в отдаленных сельских поселениях, несоответствием в определенных отрезках сечения проводов передаваемой мощности, а также большим наличием проводов марки АС, что приводит к увеличенным потерям активной мощности в цепочке «секция шин 10 кВ подстанции» – «конечный потребитель» и слабой надежностью электропередачи.

Для решения данной проблемы предлагается использование оптимизационных методов, основанных на принципах математического программирования, позволяющее найти экстремальные значения целевой функции, которая является формализованным математическим описанием или моделью, раскрывающей протекающие в указанных распределительных сетях процессы.

Целевая функция в данном случае представляет собой функцию для которой требуются определить экстремумы в зависимости от критериев оптимальности, таких как: минимум потерь активной мощности в электрических сетях, оптимальное расположение центров питания, подбор оптимального сечения проводника, подбор оптимальной трассы для питания центров питания или конечных потребителей и т. д. В единой целевой функции возможно применения в качестве критерия оптимальности минимального значения суммарных приведенных затрат, но для упрощения вычислительной нагрузки предлагается разбить имеющуюся задачу по оптимальному электроснабжению сельских поселений на несколько блоков, которые будут взаимодействовать между собой с помощью исходных и выходных данных.

Основные параметры, которые сведены в отдельные расчетные блоки:

- построение картограммы и определение условного центра электрических нагрузок;
- выбор места расположения распределительных пунктов и трансформаторных подстанций;
- схемы питающих и распределительных сетей;
- выбор сечений проводников на высокой и низкой классах напряжения.

Для сопоставления физических параметров, например, геометрических размеров участка электроснабжения, длин линий электропередачи, определения фактического места установки центров питания или введения дополнительных ограничений по размещению объектов электроэнергетической инфраструктуры, с расчетными параметрами, требуется совместить генеральный план с координатной плоскостью и обозначить координаты, размещаемых объектов по оси абсцисс и ординат в о.е.

Далее идет ввод исходных данных.

Пример оптимального проектирования схемы электроснабжения [1].

Производится проектирование схемы электроснабжения сельского поселения. Определены требуемая мощность конечных потребителей и располагаемый резерв мощности близлежащих трансформаторных подстанций. Известны также расстояния от питаемых объектов до каждой трансформаторной подстанции. Требуется определить оптимальную с точки зрения минимума приведенных затрат схему электроснабжения предлагаемого района.

Приведенные годовые затраты на сооружение и эксплуатацию электрической сети определяются по выражению:

$$Z_{\text{пр}} = p_n \cdot K + C_{\text{э}}, \text{ руб} \quad (1)$$

где p_n – нормативный коэффициент капитальных вложений; K – капитальные вложения; $C_{\text{э}}$ – стоимость потерь электроэнергии в проводах ЛЭП.

Величина капитальных вложений на сооружение ЛЭП зависит от ее сечения и длины:

$$K = (a + b \cdot S) \cdot l, \text{ руб} \quad (2)$$

где a, b – расчетные коэффициенты; S, l – сечение и длина ЛЭП соответственно.

Стоимость потерь электрической энергии в проводах ЛЭП определяется законом Джоуля-Ленца:

$$C_{\text{э}} = 3 \cdot I^2 \cdot R \cdot \text{Ц} \cdot t \quad (3)$$

где I, R – ток в фазе линии и ее активное сопротивление; Ц – отпускная цена кВт·ч электрической энергии; t – число часов работы линии в год.

Активное сопротивление линии можно определить по выражению

$$R = \rho \frac{l}{S} \quad (4)$$

где ρ – удельное сопротивление материала провода. Сечения проводников в сетях высокого напряжения определяются по экономической плотности тока:

Для n участков электрической сети суммарные приведенные затраты определяются выражением:

$$Z_{\text{пр}} = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n k_1 \cdot l_{ij} + \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n k_2 \cdot l_{ij} \cdot I_{ij} \quad (5)$$

где I_{ij} – ток, потребляемый j -м потребителем с i -й подстанции; l_{ij} – расстояние от j -го потребителя до i -й подстанции; k_1, k_2 – постоянные коэффициенты.

Для достижения минимальных приведенных затрат достаточно минимизировать второй член уравнения (2.7), при этом значение коэффициента k_2 можно не учитывать. С учетом того, что ток в линии прямо пропорционален передаваемой по ней мощности, получим выражение целевой функции решаемой задачи:

$$Z = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n l_{ij} \cdot P_{ij} \rightarrow \min \quad (6)$$

Требуется найти минимум целевой функции при следующих ограничениях:

1. Суммарная мощность, потребляемая всеми потребителями с одной подстанции должна быть равна располагаемой мощности подстанции
 2. Суммарная мощность, передаваемая всеми подстанциями одному потребителю должна быть равна требуемой мощности этого объекта
 3. Величина мощности, передаваемой по линии должна быть положительной.
- Перед решением задачи необходимо проверить баланс располагаемой и требуемой мощности и при необходимости привести задачу к сбалансированной.

Литература

Обухов С. Г. Математическое моделирование в системах электроснабжения. Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2014. – 74 с.

АНАЛИЗ ПРИЧИН ОТКАЗОВ И АВАРИЙНЫХ РАЗРУШЕНИЙ ГАЗОПРОВОДА, ФУНКЦИОНИРУЮЩЕГО В МЕРЗЛЫХ ГРУНТАХ

Капитонова Т. А., Стручкова Г. П., Ефремов П. В.

Институт физико-технических проблем Севера им. В. П. Ларионова СО РАН
г. Якутск, Россия

Магистральные нефтегазопроводы на территории Республики Саха (Якутия) относятся к наиболее опасным объектам, и обеспечение их безопасности и бесперебойного функционирования является жизненно важной задачей.

При исследовании воздействия природных техногенных факторов на трассу магистрального газопровода Мастах-Берге-Якутск выявлено, что основными причинами возникновения аварийных ситуаций и перебоев доставки газа к потребителям являются: низкие температуры, наличие многолетнемерзлых грунтов, речные переходы, возможность подтопления, большая протяженность, вероятность образования газовых гидратов, газоконденсатные и гидратные пробки, лесные пожары, человеческий фактор [1, 2, 3]. Анализ статистики аварийных ситуаций показал, что аварии повторяются в одних и тех же местах, чему способствуют: технологические нарушения укладки газопровода в траншеи, активизация геологических процессов, потеря устойчивости из-за перемены температурного режима при снятии дерна, изменения стока поверхностных вод.

Анализ наиболее характерных причин отказов газопровода Средне – Вилюйское газоконденсатное месторождение – Мастах-Берге-Якутск показал, что более 50% отказов приходится на сварные кольцевые швы с образованием сквозной трещины-свища. Изучение причин образования свищей показывает, что основными очагами разрушений служат дефекты сварки корневого шва (непровары, поры, шлаки и т. д.), являющиеся концентраторами напряжений, [4].

Выявленные в результате анализа основные причины отказов и были объединены в укрупненные группы следующим образом:

- природные явления (в т.ч. геокриологические);
- механические повреждения труб механизмами при земляных работах;
- металлургические дефекты труб;
- другие.

Анализ данных показал, что самыми значительными причинами ущерба в виде потерь объемов газа являются образование газогидратных пробок и дефекты металла д. К наибольшей потере времени на ремонт магистрального газопровода приводят также природные явления и другие.

Для каждой группы причин был рассчитан вклад в общее число аварийных случаев (доля от всех случаев), распределение ущерба по каждой аварийной ситуации от этой группы причин. Используя диаграмму Парето, проведен анализ причин, которые приводят к наибольшим потерям газа и времени на устранение аварии. На основе

вероятностно-статистического метода оценивания вероятностей ущербов выполнена задача прогнозирования рисков [5,6,7].

Используя диаграмму Парето, проведен анализ причин, которые приводят к наибольшим потерям газа и времени на устранение аварии, рис. 1.

Причинами 80% потерь газа являются газогидратные пробки и дефекты металла, а 80% времени уходит на ремонт и устранение последствий отказов.

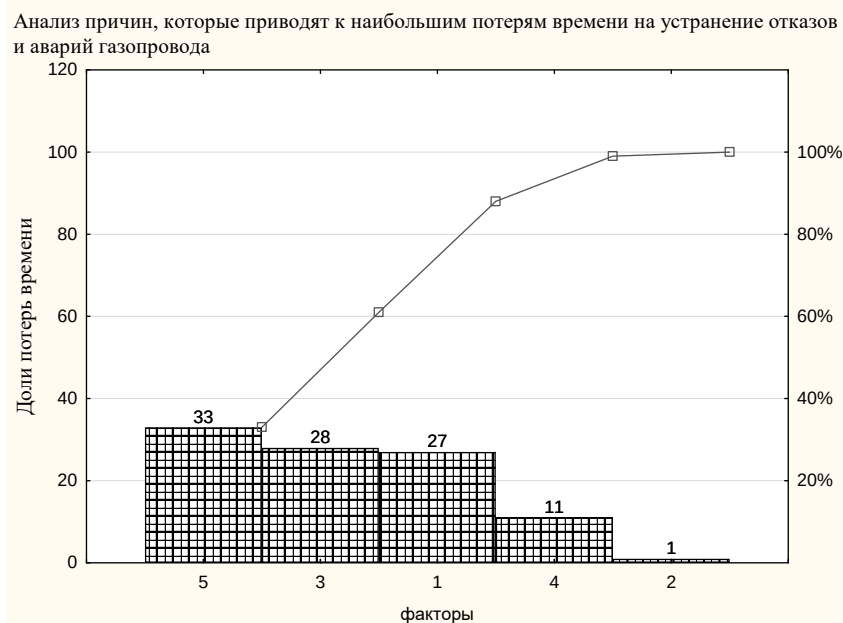


Рис. 1. Анализ причин, которые приводят к наибольшим потерям времени на устранение отказов и аварий газопровода (5- другое, 3-дефекты металла, 1- природные явления, 4-газогидратные пробки, 2-механические повреждения)

Литература

1. Слепцов О.И., Левин А. И., Стручкова Г.П., Семенова Т.И. Безопасность технических систем. Безопасность в Республике Саха (Якутия) /под редакцией В.Ю. Фридовского, В. А. Прохорова, Раздел 4., Новосибирск: Наука, 2008. — С. 249-257.
2. Слепцов О.И., Лыглаев А. В., Капитонова Т.А., Стручкова Г.П. Исследование техногенных аварий и антропогенных воздействий на экологическую безопасность Республики Саха (Якутия) // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. — 2007. — № 4. — С. 88-94.
3. Левин А. И. Хладостойкость и надежность трубопроводов Крайнего Севера: Автореф. дис. докт. техн. наук. — Якутск, 2002. — 32 с.
4. Большаков А. М. Анализ разрушений и дефектов в магистральных газопроводах и резервуарах Севера // Газовая промышленность. — 2010. — № 5. — С. 52-53.
5. Лепихин А. М., Махутов Н.А., Москвичев В. В., Черняев А. П. Вероятностный риск-анализ конструкций технических систем — Новосибирск: Наука, 2003. — 174 с.
6. Пугачев В.С. Теория вероятностей и математическая статистика. Учеб. пособие. — 2-е изд., исправл. и доп. — М.: Физматлит, 2002. — 496 с.
7. Faisal Khan, Samith Rathnayaka, Salim Ahmed Methods and models in process safety and risk management: Past, present and future. Process Safety and Environmental Protection, Vol. 98, November 2015, P. 116-147.

ЗАДАЧИ СТРАТЕГИЧЕСКОГО ПЛАНИРОВАНИЯ РАЗВИТИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ РЕГИОНА СЕВЕРА: НА ПРИМЕРЕ РЕСПУБЛИКИ САХА (ЯКУТИЯ)

Захаров В. Е.

Институт физико-технических проблем Севера им. В. П. Ларионова СО РАН
Якутск, Россия

Аннотация. Специфика регионов Севера обуславливает наличие объективных проблем обеспечения энергетической безопасности. В статье приводятся технические задачи развития энергетической инфраструктуры региона Севера на примере Республики Саха (Якутия), стоящие перед наукой и государственной властью.

Abstract. The specificity of the regions of the North determines the presence of objective problems of ensuring energy security. The article presents the technical tasks of the development of the energy infrastructure of the North region on the example of the Republic of Sakha (Yakutia), which science and government are facing.

Регионы Севера из-за сложных природно-климатических условий в настоящее время слабо освоены. Плотность населения здесь чрезвычайно низка, а небольшие населенные пункты расположены на значительном удалении друг от друга и в труднодоступных местах. Незначительность населения не позволяет строить и содержать транспортную инфраструктуру, связывающую их с остальным миром. Грузоперевозки в этих регионах осуществляются по естественным водным путям, подверженным сезонным и природным ограничениям, а также через автозимники. Значительная часть суши на северных широтах находится на территории Российской Федерации. В так называемом Азиатском Севере расположены 6 регионов РФ. Из них Тюменская область, Красноярский Край, Республика Саха (Якутия) представляют собой особо крупные регионы с большими городскими агломерациями с развитой транспортной инфраструктурой в обжитой части. Камчатский Край, Чукотская и Магаданская области в большей части связаны с другими регионами через морские пути. Магаданская область имеет единственный автотранспортный коридор – федеральную трассу Р-504 «Колыма», связывающий города Якутск и Магадан, протяженностью 1126 км. В крупных регионах энергоснабжение труднодоступных удаленных потребителей проводится за счет распределения доходов бюджета от реализации крупных сырьевых проектов в развитой части. Мелкие регионы практически полностью зависят от субсидирования из федерального бюджета.

Главная, системообразующая цель стратегического планирования развития региональной энергетической инфраструктуры заключается в формировании системы устойчивого обеспечения энергетической безопасности на долгосрочной перспективе. При этом региональная энергетическая инфраструктура является частью национальной системы обеспечения энергетической безопасности. Национальная энергетическая инфраструктура является в то же время масштабной экспортно-ориентированной отраслью экономики страны. Таким образом задача обеспечения энергетической безопасности страны и развития ТЭК, как экономической единицы, в определенной степени конкурируют между собой за единую сырьевую базу, кадровые и прочие ресурсы [1]. Обширная территория регионов Севера находится в значительном удалении от экспортно-ориентированной энергетической инфраструктуры и не имеет возможности получения синергетического эффекта от них. При этом, как показывает практика, выполнения экспортных контрактов имеет более высокий приоритет по сравнению с обеспечением энергетической безопасности собственных потребителей. Решение задач топливоснабжения внутренних небольших потребителей в зоне реализации крупных проектов по добыче углеводородного сырья на не освоенных территориях натывается на отсутствие технических экономически пригодных решений. Ярким примером является отсутствие малотоннажного флота СПГ, способного обеспечить потребителей расположенных на акватории северных рек от морских газозовозов. Освоение местных видов топлива для внутренних нужд, в большей части углей, нерентабельно, а в ряде случаев запрещено природоохранными (обширные территории нереста ценных пород рыб, заповедники и т. д.) и иными ограничениями. Расширение геологоразведочных работ по поиску углеводородов также встречает экономические барьеры в связи с незначительным внутренним перспективным спросом [2,3].

Таким образом перед энергетической наукой и государственной властью стоят сложные задачи методического характера по грамотному выстраиванию энергетической политики в регионах Севера для защиты национальных интересов и достижения целей международного устойчивого развития.

Литература

1. Северо-Восток России: региональная экономика и управление. / Е.А. Борисов, Е.Н. Галичанин, В. А. Уваров, В. А. Штыров и др.; Под редакцией д.э.н. В. А. Уварова. Монография: 2-е издание, переработанное и дополненное, Москва: Финтрекс, 2006. – 624 с.
2. Захаров В. Е. Энергетическая безопасность как основная цель региональной энергетической стратегии // Теплофизика и энергетика Арктических и субарктических территорий [Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием]. – 2019. – Якутск. с.169-172.
3. Захаров В.Е., Иванова А.Е., Петрова Т.Н. Энергетика Арктической зоны Республики Саха (Якутия): текущая ситуация и перспективы развития // «Экономика Востока России». №1, 2019 с.81-86

ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКАЯ КОМПОНЕНТА ГРОВОВЫХ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ В ЛЭП В УСЛОВИЯХ МНОГОЛЕТНЕЙ МЕРЗЛОТЫ

Лонгинова В. Я.¹, Григорьев Ю. М.^{1, 2}

¹ Северо-восточный федеральный университет им. М. К. Аммосова

² Академия наук Республики Саха (Якутия)
Якутск, Россия

Аннотация. В работе представлена математическая модель электростатической компоненты грозových перенапряжений в ЛЭП. Математически задача сводится к решению начально-краевых задач для новой обобщенной системы телеграфных уравнений многопроводных линий с неоднородностью в уравнениях. Это позволяет учесть наличие многолетней мерзлоты и зависимость тока молнии от времени.

Abstract. The paper presents a mathematical model of the electrostatic component of lightning overvoltage in power lines. Mathematically, the problem is reduced to solving of initial-boundary value problem for a new generalized system of telegraph equations for multiconductor lines with inhomogeneity in the equations.

Вопросы защиты ЛЭП от грозových воздействий в условиях многолетней мерзлоты, характеризуемой плохой электропроводностью земли, все еще не имеют исчерпывающего решения. Отчеты ПАО «Якутскэнерго» показывают, что количество грозových отключений ЛЭП не уменьшаются от года к год. Исследования показывают, что интенсивность грозовой активности имеет тенденцию к интенсификации в условиях потепления климата [1]. Поэтому всестороннее изучение явлений, связанных с грозowymi воздействиями на ЛЭП остается актуальным. Подобные исследования для регионов без мерзлоты интенсивно проводятся [2, 3], но для регионов с многолетней мерзлотой требуются другие подходы. В данной работе мы представляем математические модели для оценки характеристик грозových перенапряжений в ЛЭП в условиях многолетней мерзлоты.

Индукцированные гроззовые напряжения в ЛЭП состоят из двух компонент: электромагнитной (ЭМ) и электростатической (ЭС). За первую компоненту ответственно электромагнитное излучение канала молнии. ЭС-компонента возникает вследствие изменения электростатического поля грозowego облака при разряде молнии. В регионах с хорошей проводимостью грунта основной вклад дает ЭМ-компонента, методы ее расчета достаточно проработаны (см. [2, 3] и ссылки в них). Для регионов с существенно неоднородной структурой грунтов, особенно при наличии многолетней мерзлоты, методы моделирования индуцированных грозových напряжений только разрабатываются. Для однопроводной линии нами показано, что в условиях многолетней мерзлоты величины ЭС-компоненты могут быть достаточными чтобы вызвать аварийные явления [4-8]. В данной работе представляется математическая модель ЭС-компоненты в многопроводной линии передачи.

ЛЭП представляет собой систему, состоящую из нескольких параллельных друг другу проводников, расположенных над проводящим полупространством (земля). При

разряде молнии вблизи ЛЭП вдоль линии распространяются квази-поперечные электромагнитные волны. В этом случае применяется модель МЛП, подробно описанная [9]. Для использования такого подхода вводим декартову систему координат, оси x и y расположены над полупространством, ось z направлена перпендикулярно полупространству, а ось x направлена вдоль линии передачи. Грозное облако моделируется точечным зарядом Q , расположенным на оси z . Таким образом, ЛЭП расположена в электростатическом поле точечного заряда Q и его электростатическое изображение в нижнем полупространстве. В момент времени $t=0$ грозное облако начинает разряжаться с током молнии $J(t) = dQ(t)/dt$. Пусть за время dt из облака исчезнет заряд dQ . Это можно интерпретировать следующим образом: в месте расположения облака (и его электростатического изображения) появился дополнительный заряд $-dQ$ (и его электростатическое изображение). Этот дополнительный заряд на каждом проводе МЛП индуцирует дополнительный потенциал. Следовательно, из-за электрической емкости на каждом проводнике индуцируются дополнительные заряды. Эти рассуждения показывают, что эффект разряда грозной тучи сводится к появлению некоего «генератора» зарядов в каждом бесконечно малом элементе линейного проводника. Учитывая действие этого дополнительного «генератора» при выводе уравнений мы получаем новую обобщенную систему телеграфных уравнений для нашей модели. Эта система является неоднородной, в правой части появляются функции, пропорциональные емкостным коэффициентам и току молнии. Наличие слоя мерзлоты в модели учитывается в потенциале точечного заряда, расположенного над полупространством. В первом приближении, пренебрегая разницей между диэлектрическими проницаемостями воздуха и мерзлой земли можно использовать выражение для потенциала точечного заряда, расположенного над однородным проводящим полупространством. При более точном учете слоистости земли выражение для этого потенциала соответственно усложняется.

Таким образом, расчеты ЭС-компоненты грозных перенапряжений в ЛЭП в условиях многолетней мерзлоты сводятся к решению начально-краевых задач для новой обобщенной системы телеграфных уравнений многопроводной линии. Начальные условия для токов и напряжений берутся равными нулю, краевые условия могут быть разными, в соответствии с моделируемой ситуацией. Результаты могут быть получены численной реализацией. Модельные результаты могут быть получены с использованием точных решений системы телеграфных уравнений для МЛП [10, 11].

Литература

1. Tarabukina L., Kozlov V. Seasonal Variability of Lightning Activity in Yakutia in 2009–2019 // *Atmosphere*. 2020. V. 11. N. 9. P. 918; doi: 10.390/atmos11090918.
2. F. Rachidi. Formulation of the field-to-transmission line coupling equations in terms of magnetic excitation fields // *IEEE Trans. Electromagn. Compat.* 1993. V. 35. No. 3. P. 404–407. DOI: 10.1109/15.277316.
3. F. Rachidi. A Review of Field-to-Transmission Line Coupling Models With Special Emphasis to Lightning-Induced Voltages on Overhead Lines // *IEEE Trans. Electromagn. Compat.* 2012. V. 54. No. 4. P. 898–911. DOI: 10.1109/TEMC.2011.2181519.
4. Григорьев Ю.М., Орлова М.Н. Математическая модель грозных перенапряжений в линии передач с учетом зависимости тока молнии от времени // *Вестник Якутского государственного университета*. 2007. Т. 4. № 2. С. 45–52.
5. Григорьев Ю.М., Орлова М.Н. Индуцированные перенапряжения в линии передач при разряде молнии между облаками // *Математические заметки ЯГУ*. 2009. Т. 16. № 1. С. 129–142.
6. Григорьев Ю.М., Орлова М.Н. Влияние ближнего разряда молнии на линию передачи // *Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. академика М.Ф. Решетнева*. 2009. № 1-1 (22). С. 23–26.
7. Grigor'ev Y. M., Borisova M. N., Longinova V. Y., Ivanova A. A. Mathematical models of lightning-induced voltages in transmission lines in a permafrost region // *AIP Conference Proceedings*. 2017. 1907, 030016. DOI: 10.1063/1.5012638.
8. Grigor'ev Y. M., Borisova M. N., Longinova V. Y. and Popova A. A. The electrostatic component of lightning induced currents in a short transmission line on a permafrost // *AIP Conference Proceedings*. 2018. 2041, 050020. DOI: 10.1063/1.5079389.

10. C. R. Paul, Analysis of Multiconductor Transmission Lines, 2nd ed. New York, NY: John Wiley & Sons, 2008.
11. Grigor'ev Yuri. On a nondistorting transmission line / IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility. 1994. Sendai, Japan, May 16–20. P. 29-31.
12. Nogovitsyn, P. I., & Grigor'ev, Y. M. Exact analytical solutions of multiconductor transmission line equations / AIP Conference Proceedings. 2021. 050019, 2328. doi:10.1063/5.0042819.

РАССЕЯННОЕ СОЛНЕЧНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ, ПОСТУПАЮЩЕЕ НА ГОРИЗОНТАЛЬНУЮ ПОВЕРХНОСТЬ: ЭМПИРИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ И МЕТОДЫ ОЦЕНКИ

Прохоров Д. В.

Институт физико-технических проблем Севера им. В. П. Ларионова СО РАН
Якутск, Россия

Аннотация. Рассмотрены эмпирические модели оценки рассеянного солнечного излучения, поступающего на горизонтальную поверхность, различных авторов. Дана характеристика природно-климатических условий Центральной и Северо-Восточной Якутии. Выбраны методы и модели оценки рассеянного солнечного излучения, поступающего на горизонтальную поверхность, наиболее подходящие для выбранных регионов Республики Саха (Якутии). Выделены параметры, которые требуются для разработки методов и моделей оценки рассеянного солнечного излучения, поступающего на горизонтальную поверхность, в условиях выбранных регионов.

Abstract. Empirical models for estimate the horizontal diffuse solar radiation by various authors are considered. The characteristic of natural and climatic conditions of Central and North-Eastern Yakutia is given. Methods and models most suitable for the selected regions of the Sakha Republic for estimating horizontal diffuse solar radiation have been selected. The parameters that are required for the development of methods and models for estimating the horizontal diffuse solar radiation in the conditions of the selected regions are highlighted.

В связи с ростом числа проектов в области солнечной энергетики во всем мире существует крайняя необходимость в надлежащей оценке солнечной энергии. Значительная ошибка в оценке производства энергии солнечными панелями и коллекторами возникает из-за неточной оценки солнечной энергии. Рассеянное излучение играет важную роль в оценке полного солнечного излучения и ее трудно измерить. Для оценки рассеянного солнечного излучения поступающего на горизонтальную поверхность, было разработано множество эмпирических моделей. Для этой цели использовались различные параметры и функциональные формы [1].

Лучший способ определения количество поступающего солнечного излучения в конкретном месте – это установить высокоточное измерительное оборудование. Солнечное излучение измеряется с помощью различных инструментов, таких как пиранометры и пиргелиометры. Однако это не всегда возможно из-за ряда факторов, таких как нехватка необходимых приборов, а также из-за финансовых проблем, данные о солнечном излучении труднодоступны, особенно для станций в развивающихся странах и изолированных регионах. Фактически, несмотря на постоянные во всем мире усилия по созданию дополнительных станций измерения солнечного излучения в последние годы, количество актинометрических станций, регистрирующих солнечное излучение, особенно ее рассеянную составляющую, все еще ограничено. На территории Республики Саха (Якутия) всего 76 метеорологических станций, 9 из которых актинометрические. Для получения надежных данных о поступлении энергии солнечного излучения имеющаяся в настоящее время сеть метеорологических станций недостаточна. Как следствие, крайне важно определить количество рассеянного солнечного излучения на основе оценочных методов.

Американские ученые Лю и Джордан были пионерами в изучении корреляции между коэффициентом рассеивания (k) и индексом ясности (k_t) [2]. С тех пор множество исследовательских групп разработали уравнения регрессии, связывающие коэффициент рассеивания и коэффициент ясности с периодичностью в год, месяц, день и час для различных мест по всему миру. Существует множество моделей оценки рассеянной составляющей солнечного излучения, некоторые из них будут рассмотрены в статье.

На основе анализа существующих эмпирических моделей оценки рассеянной составляющей солнечного излучения были выбраны модели наиболее подходящие для использования в природно-климатических условиях Якутии. Выбраны параметры, которые требуют дальнейшего изучения и определения для составления уникальной модели оценки рассеянного солнечного излучения поступающего на горизонтальную поверхность для условий Центральной и Северо-Восточной Якутии.

Литература

1. Hossein Khorasanizadeh, Kasra Mohammadi Diffuse solar radiation on a horizontal surface: Reviewing and categorizing the empirical models // *Renew Sustain Energy Rev.* – 2016. – Vol. 53. – Pp. 338-362.
2. B. Y. H. Liu and R. C. Jordan The interrelationship and characteristics distribution of direct, diffuse and total radiation // *Solar Energy* – 1960. – Vol. 4(3). – Pp. 1-19.

ПРОБЛЕМНЫЕ ВОПРОСЫ И НЕОБХОДИМОСТЬ ИЗМЕНЕНИЙ В АРХИТЕКТУРЕ ГОРЯЧЕГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ МНОГOKBAPТИРНЫХ ДОМОВ

Унжаков А. С.

Институт физико-технических проблем Севера им. В. П. Ларионова СО РАН
Якутск, Россия

Аннотация. Описана система и структура водоснабжения, применяемая в многоквартирных домах. Обозначены актуальные проблемы архитектуры горячего водоснабжения, с которыми в настоящее время сталкиваются потребители. Предложены решения проблемы горячего водоснабжения многоквартирных домов.

Abstract. The water supply system and structure used in apartment buildings is described. The actual problems of hot water supply architecture consumers are currently facing are indicated. Solutions to the problem of hot water supply in apartment buildings are proposed.

Современная энергетика представляет собой сложный инфраструктурный комплекс, основы формирования которого были заложены в советские годы. Приоритетом тех времен были высокие темпы освоения новых территорий, решение глобальных, стратегических задач по обеспечению электро- и теплоэнергией, обеспечение жильем населения на территории самого большого в мире государства в кратчайшие сроки и с наименьшими затратами. Эффективным методом для решения вышеупомянутых задач стало строительство многоквартирных домов с центральным энергоснабжением. Комфортная среда, рациональное использование энергетических ресурсов были второстепенными факторами при проектировании многоквартирных домов, что отразилось на принципе проектирования и строительства внутридомовых тепловых сетей и сетей горячего водоснабжения. Особенно актуальным вопрос горячего водоснабжения становится в условиях резко отрицательных температур наружного воздуха в районах Крайнего Севера, в частности в Республике Саха (Якутия).

С вступлением в силу ряда федеральных законов, СНиП, СанПиН [1–4] прослеживается явное изменение государственной политики в отношении рационального использования энергетических ресурсов и их учету, в том числе в отношении горячего водоснабжения. Однако на сегодняшний момент существуют ряд проблем в области горячего водоснабжения многоквартирных домов. Одна из них – система горячего во-

доснабжения без обратного трубопровода. При такой схеме горячая вода не циркулирует в системе и быстро остывает, и чтобы конечному потребителю получить воду нужной температуры (не менее 60°C), ее нужно слить через кран. С учетом удаленности источника горячего водоснабжения от многоквартирного дома, протяженности внутридомовых сетей горячего водоснабжения, а также суточного режима внутридомового водоразбора необходимость длительного слива воды является единственным решением для получения качественной услуги горячего водоснабжения. При этом учет слитой воды происходит водяным счетчиком горячего водоснабжения, а расчет с ресурсоснабжающей организацией происходит в соответствии с тарифом на горячую воду.

В соответствии с проведенными мною исследования и расчетами потребления горячей воды в многоквартирных домах, расход по счетчику горячего водоснабжения в домах с отсутствием обратного трубопровода, превышает расход по счетчику горячего водоснабжения в домах с наличием обратного трубопровода в 1,5–2 раза, что ведет за собой дополнительные неоправданные финансовые затраты потребителей, что в соответствии с тарифом на горячее водоснабжение [5] составляет в среднем от 5 до 8 тысяч рублей в год. Кроме того, отсутствие своевременного качественного горячего водоснабжения вызывает множество бытовых неудобств, особенно в условиях продолжительных резко отрицательных температур районов Крайнего Севера и в целом Российской Федерации. В масштабах отдельного города, региона, страны дополнительные неоправданные финансовые затраты потребителей достигают внушительных размеров.

Решением вышеупомянутой проблемы горячего водоснабжения многоквартирных домов могла бы стать:

- принятие на законодательном уровне мер, обязывающих ресурсоснабжающие организации и обслуживающие многоквартирных фонд организации обеспечить качественное горячее водоснабжение путем реконструкции и дооснащения сетей горячего водоснабжения необходимым оборудованием (теплообменник, обратный трубопровод и прочее), либо путем их восстановления при неработоспособном состоянии;
- применение региональных ГКЦ-РЭК поправочных коэффициентов к тарифам на горячее водоснабжение в многоквартирных домах с отсутствующей циркуляцией горячей воды;
- разработка и применение счетчиков горячего водоснабжения, суммарно измеряющих и объем потребленной воды, и ее температуру.

Литература

1. Федеральный закон от 23.11.2009г. №261 «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности...».
2. Федеральный закон от 7 декабря 2011 г. № 416-ФЗ "О водоснабжении и водоотведении".
3. Строительные нормы и правила 2.04.01-85* Внутренний водопровод и канализация зданий» (Приказ Минстроя России от 16 декабря 2016 г. № 951/пр).
4. Санитарные правила и нормы 2.1..2496-09 «Гигиенические требования к обеспечению безопасности систем горячего водоснабжения. Изменение к СанПиН 2.1..1074-01» от 07.04.2009 N 20 (с изм. от 02.04.2018).
5. Постановление ГКЦ-РЭК РС(Я) от 17.12.2020г. №291 «О корректировке долгосрочных тарифов на горячую воду...на 2021 год».

Часть II

Математическое моделирование

Модели и численные методы решения задач тепломассообмена и гидрогазодинамики

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ УПРУГИХ И ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ИСКУССТВЕННЫХ ЛЕДОВЫХ ОСТРОВАХ

Муратов М. В., Конов Д.С., Петров И. Б.
Московский физико-технический институт
Долгопрудный, Россия

Данный доклад посвящен изучению устойчивости искусственных ледовых островов к механическим и термическим статическим и динамическим воздействиям с использованием численного моделирования. Для моделирования упругих воздействий, возникающих в результате ударных воздействий при бурении, а также, из-за давления конструкций, расположенных на острове, решается система уравнений механики сплошных сред с использованием сеточно-характеристического метода. Сеточно-характеристический метод наиболее точно описывает динамические процессы в задачах сейсморазведки, поскольку учитывает природу волновых явлений. Численный метод позволяет строить корректные вычислительные алгоритмы на границах и контактных границах области интегрирования. В работе исследуется процесс распространения упругих волн в рассматриваемой геологической среде, моделируется распределение напряжений, а также исследуется устойчивость ледяного острова к разрушению с применением критерия Мизеса.

Для изучения термических воздействий на ледовый остров сформулирована задача Стефана об изменении фазового состояния вещества. Построен энтальпийный метод решения, рассмотрена применимость этого метода. Для численного решения применяется схема Писмена-Рекфорда, которая является безусловно спектрально устойчивой в двумерном случае, что позволяет свободно выбирать шаг по времени. Кроме того, разработанный подход учитывает течение воды и стекание растаявшей воды, что важно в поставленной задаче. Реализован подход для моделирования тепловых процессов в толще произвольного массива веществ с учетом произвольных начальных условий, условий внешней среды, приливных течений воды, солнечного излучения. С помощью этой подхода произведен расчет распределения температуры в толще ледового острова, а также проведены исследования воздействия сезонных температурных изменений на устойчивость острова.

This report is dedicated to sustainability of an artificial ice island to mechanical and thermal interactions with use of numerical modelling. Mechanical impacts, which are caused by the shock impacts during drilling, as well as the pressure from man-made structures on the island are modeled by solving continuum mechanics equations numerically using grid-characteristic method. Grid-characteristic method is the most precise to describe dynamic processes in seismic tomography because it considers the origin of seismic waves phenomena. Numerical method allows to develop computational algorithms which are correct on the boundaries and interfaces of the integrational domain. Stress distribution along with elastic wave propagation is studies. Von Mises criterion is used to analyze the sustainability of the island to fractures.

Stefan task is formulated to analyze phase change due to thermal impacts on the island. Enthalpy method is developed, it's limits of applicability are discussed. Pismen-Rekford scheme, which is absolutely stable in two-dimensional case, is presented to solve the problem effectively with use of arbitrary time step. Developed method is capable of considering special effects i.e. water flow and melted water runoff from the top of the island which is important for the task. Modeling also allows different substances in the medium with arbitrary initial and boundary conditions, environment conditions, heat flux from solar radiation, water currents. Using this approach field of temperature inside an ice island after construction is calculated. Research of the resistance to the seasonal temperature changes of the island is conducted.

Постановка задачи

Область интегрирования представляет собой ледовый остров [1] высотой 10 м и горизонтальной протяженностью 300 м. Остров погружен в воду на глубину 8 м и опирающийся на твердую почву. Геометрические размеры области и схема расположения приведены на рис. 1. Лед, вода и почва считаются однородными. Упругие и теплофизические характеристики веществ представлены в таблице 1. Также считаем, что температура плавления льда $T_0 = 0^\circ\text{C}$, а его удельная теплота плавления $\lambda = 334$ кДж/кг.

Таблица 1

Среда	C_p , м/с	C_s , м/с	ρ , кг/м ³	K , Вт/(м*К)	k , Дж/(кг*К)
Лед	3940	2493	917	0.591	2100
Вода	1500	-	1025	2.22	4180
Придонный грунт	1806	316	2000	0.8	750
Осадочные породы	2250	1000	2000	-	-
Воздух	-	-	1.6	0.022	-



Рис. 1. Геометрия области интегрирования.

На ледяном острове моделируются следующие виды нагрузок: ударная нагрузка воздействия бура, воздействие статической нагрузки сооружения

Так же решалась задача Стефана [2]. Находилось распределение температур в ледовом острове при средних значениях температуры в зимний период. Так же производились расчеты с целью исследования устойчивости ледового острова к таянию при сезонных температурных изменениях.

Результаты моделирования

Был изучен процесс распространения волн при бурении, распределение напряжений в ледовом острове и его устойчивость к разрушению. На рис. 2 показано распределение напряжений Мизеса в момент времени $t = 0.0325$ с начала бурения. Опытным путем было установлено, что остров начинает разрушаться при амплитуде импульса волны, вызванной ударом бура равной 10^{12} Па. Это значение слишком велико и не может быть в реальных условиях.

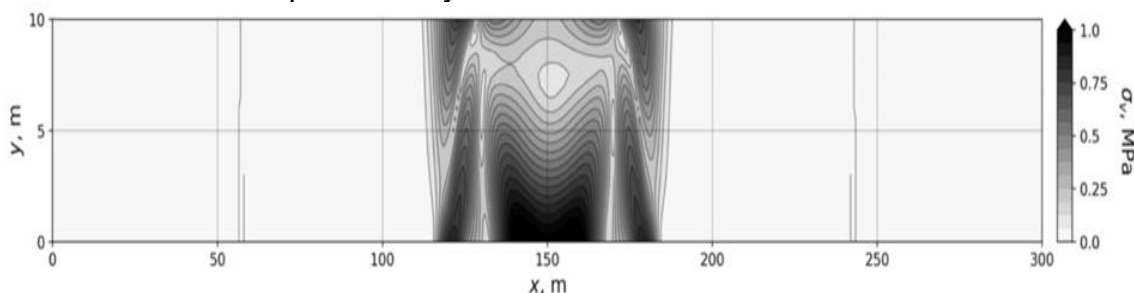


Рис. 2. Распределение напряжений Мизеса при воздействии бура

Для решения задачи распределения статической нагрузки был использован метод установления [12]. Распределение напряжений считалось устойчивым, если модуль скорости распространения упругих волн оказывается в 20–30 раз ниже по сравнению со скоростью в начальный момент. После завершения 200 тысяч шагов модуль скорости уменьшился примерно в 33 раза. Таким образом, полученное распределение напряжений можно считать устойчивым. Распределение напряжений Мизеса для устойчивого состояния представлено на рис. 3. Максимальное напряжение Мизеса в задаче составило 2,2 кПа. Эта величина меньше предельного сдвигового напряжения для льда. Таким образом, при реальных значениях статической нагрузки лед не разрушается.

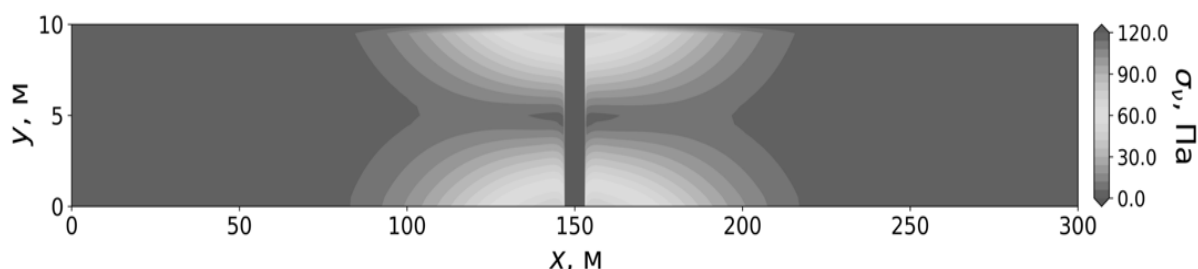


Рис. 3. Распределение напряжений Мизеса при воздействии статической нагрузки

Было проведено моделирование для определения равновесного распределения температур в ледовом острове при температуре воздуха -40 °С, температуре донного грунта 5 °С и температуре воды 3 °С. Решалась задача установления, начальная температура ледового острова составляла -10 °С, контактирующие вещества (вода, воздух, грунт) задавались в виде граничных условий с заданными температурами, теплоемкостями и коэффициентами теплопроводности. На рис. 4 приведены результаты расчета установления температуры. Моделировался период 150 дней.

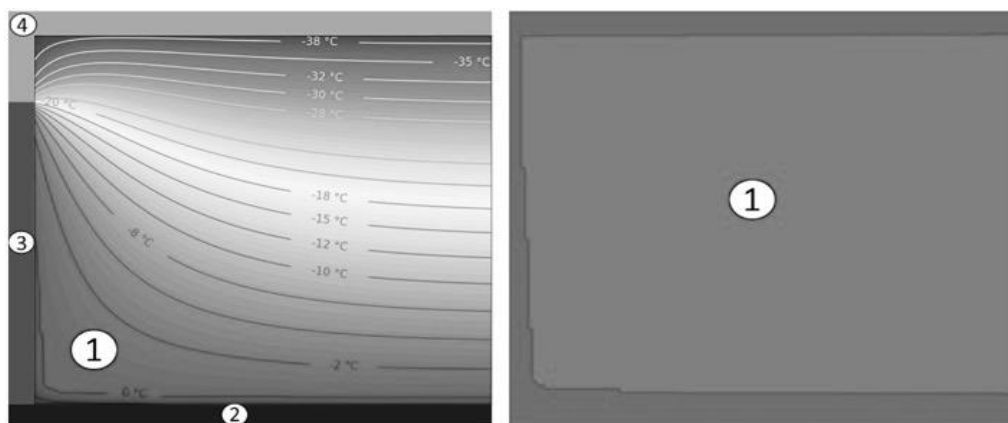


Рис. 4. Распределение температуры в ледовом острове (слева) и карта фазовых состояний (справа)

Слева приведена картина распределения температур в ледовом острове, справа – карта фазовых состояний.

Заключение

Используемый в работе подход, основанный на сеточно-характеристическом методе, позволяет моделировать задачи устойчивости ледяного острова к воздействию бура и статической нагрузки. Используемый подход позволяет оценить влияние различных видов упругих воздействий на ледяной остров и определить их критические значение, приводящее к разрушению.

Термодинамические процессы в среде ледового острова рассматриваются с использованием энтальпийного подхода. Представленная его модификация позволяет учитывать перемешивание воды, образующейся при таянии. Численные эксперименты могут оказать помощь при строительстве ледовых островов и предсказать их поведение с учетом сезонных колебаний, предложить процедуры проверки их целостности и увеличения продолжительности жизни.

Литература

1. Gorgutsa E.Yu., Kurilo E.Yu. Artificial ice islands construction in Arctic conditions // *Gidrotekhnika*. XXI vek. – 2017. – Vol. 4, No. 32. – pp. 54-57.
2. Albu A.F., Zubov V.I., 2011. Choosing a cost functional and a difference scheme in the optimal control of metal solidification // *Computational Mathematics and Mathematical Physics*. – 2011. – No. 51. – pp. 21-34.

О ВЛИЯНИИ МЛАДШИХ КОЭФФИЦИЕНТОВ НА КОРРЕКТНОСТЬ КРАЕВЫХ ЗАДАЧ ДЛЯ КВАЗИГИПЕРБОЛИЧЕСКИХ УРАВНЕНИЙ

Кожанов А. И.¹, Пинигина Н. Р.²

¹ Институт математики им С.Л. Соболева СО РАН, Новосибирск, Россия

² Северо-восточный федеральный университет им. М. К. Аммосова, Якутск, Россия

Изучается влияние младших коэффициентов квазигиперболических уравнений на существование и несуществование, единственность и неединственность решений краевых задач.

It is studied the influence of the lowest coefficients of quasi-hyperbolic equations on the existence and non-existence, uniqueness and non-uniqueness of solutions of boundary value problems.

Квазигиперболическими уравнениями в последнее время называют дифференциальные уравнения вида:

$$(-1)^{p+1} \frac{\partial^{2p} u}{\partial t^{2p}} - \Delta u + \Phi u = f(x, t), \quad (*)$$

в которых $p > 1$ – целое, Δ – оператор Лапласа по пространственным переменным, Φu – младшие члены (при $p = 1$ эти уравнения являются обычными гиперболическими уравнениями). Подобные уравнения возникают при моделировании некоторых процессов квантовой физики, при изучении ионно-акустических волн, и т. д.

В монографии [1] описаны некоторые достаточные условия, обеспечивающие существование и единственность решений различных краевых задач для уравнений (*).

В настоящей работе будут:

1. Приведены новые достаточные условия разрешимости тех или иных краевых задач для уравнений (*);

2. Описаны эффекты неединственности и несуществования решений при нарушении достаточных условий разрешимости, и, в частности, описаны условия появления действительных собственных чисел;

3. Приведены некоторые результаты о разрешимости нелокальных задач для уравнений (*).

Литература

1. Егоров И.Е., Федоров В.Е. Неклассические уравнения математической физики высокого порядка. Новосибирск: изд-во ВЦ СО РАН, 1995. 131 с.

ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЕ УРАВНЕНИЯ ВЫСОКОГО ПОРЯДКА СО СЛАБЫМ ВЫРОЖДЕНИЕМ

Кожанов А. И.

Институт математики им. С. Л. Соболева СО РАН, Новосибирск, Россия;
Академия наук РС(Я), Якутск, Россия

Доклад посвящен изложению новых результатов о разрешимости краевых задач для вырождающихся дифференциальных уравнений высокого порядка.

The report is devoted to the presentation of new results on the solvability of boundary value problems for degenerate differential equations of higher order.

В настоящем докладе излагаются новые результаты о разрешимости естественных краевых задач для квазиэллиптических, квазипараболических и квазигиперболических уравнений, а также для уравнений с кратными характеристиками с обращающимся в нуль коэффициентом при старшей производной по временной (выделенной) переменной. Особенностью изучаемых задач является то, что в них отсутствует "эффект Келдыша" – эффект, означающий, что для характеристически вырождающихся дифференциальных уравнений граничные многообразия, на которых происходит вырождение, должны полностью или частично освободиться от несения краевых условий.

НЕКЛАССИЧЕСКИЕ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЕ УРАВНЕНИЯ В НЕЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБЛАСТЯХ

Кожанов А. И.^{1, 2}, Лукина Г. А.

¹ Институт математики им. С. Л. Соболева СО РАН, Новосибирск, Россия,

² Академия Наук Республики Саха (Якутия), Якутск, Россия

³ Политехнический институт (филиал) Северо-Восточный федеральный университет имени М. К. Аммосова, Мирный, Россия

Изучается разрешимость краевых задач для некоторых неклассических дифференциальных уравнений в нецилиндрических областях.

We study solvability of boundary value problems for some nonclassical differential equations in noncylindrical domains.

В работе изучается разрешимость новых краевых задач в нецилиндрических областях для псевдопараболических и псевдогиперболических уравнений, а также для уравнений с кратными характеристиками. Особенностью изучаемых задач является то, что соответствующие уравнения рассматриваются в нецилиндрических по временной переменной областях, а не в областях с криволинейными боковыми сторонами (областях с подвижной границей), как в работах предшественников.

Целью работы является доказательство теорем существования и единственности регулярных решений – т. е. решений, имеющих все обобщенные по С. Л. Соболеву производные, входящие в соответствующее уравнение.

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ ТРУБОПРОВОДОВ, ПРОКЛАДЫВАЕМЫХ В УСЛОВИЯХ ВЕЧНОЙ МЕРЗЛОТЫ, С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Ермаков Б. С.¹, Шапошников Н. О.¹, Альхименко А. А.¹, Лупуляк С. В.¹,
Голубев И. А.¹, Слепцов О. И.²

¹ Научно-технологический комплекс «Новые технологии и материалы», Национальный исследовательский университет ФГАОУ ВО «СПбПУ», Санкт-Петербург, Россия

² Институт физико-технических проблем Севера им. В. П. Ларионова СО РАН, Якутск, Россия

В данной работе рассматривается математическое моделирование теплового взаимодействия подземных участков трубопроводов с грунтами в условиях вечной мерзлоты. Актуальность задачи заключается в заблаговременности выявления опасных участков для снижения частоты аварий трасс нефте- и газопроводов. Разработка модели позволяет открывать новые технологические решения, которые способны предупредить или же компенсировать негативное воздействие тепла для трубопроводов, прокладываемых в данных условиях.

This paper discusses the mathematical modeling of the thermal interaction of underground sections of pipelines with soils in permafrost conditions. The relevance of the problem lies in the early identification of hazardous areas to reduce the frequency of accidents in oil and gas pipelines. The development of the model makes it possible to discover new technological solutions that can prevent or compensate for the negative effects of heat for pipelines laid in these conditions.

В настоящее время нефтегазовые компании все больше ориентированы к освоению территорий с аномальными природными условиями – сейсмика, движение тектонических блоков, оползни, морозное вспучивание, таяние вечной мерзлоты и так далее. Проектирование трасс нефте- и газопроводов в таких условиях, характеризующихся наличием большого количества напрямую не коррелирующийся между собой факторов, становится возможным только с использованием современных подходов к математическому моделированию. Одной из локальных задач моделирования является расчет теплового взаимодействия подземных участков трубопроводов с грунтами основаниями. Известно, что в результате растепляющего антропогенного воздействия на мерзлые породы возможно возникновения локального подтаивания, приводящее к снижению прочности грунтов в контактных с трубопроводом участках и, как следствие, увеличению напряженно-деформированного состояния трубопровода. Для выбора теплоизоляции необходимо учесть большое количество факторов: состав и свойства грунтов оснований; конвективный теплообмен поверхности грунтов с воздухом, с учетом температуры воздуха, скорости ветра, толщины снежного покрова; зависимость теплопроводности и теплоемкости грунтов от температуры и влажности за счет незамерзшей

воды; выделение или поглощение тепла при фазовом переходе вода-лёд; влияние осадков, их испарения и фильтрации на теплофизические свойства грунтов.

Для решения задач расчета теплового взаимодействия трубопровода с грунтами предлагается использовать метод конечных элементов, с помощью которого решается дифференциальное уравнение теплопроводности. Также производится прогнозный тепловой расчет, с использованием осреднённых метеорологических данных за последние 5 лет.

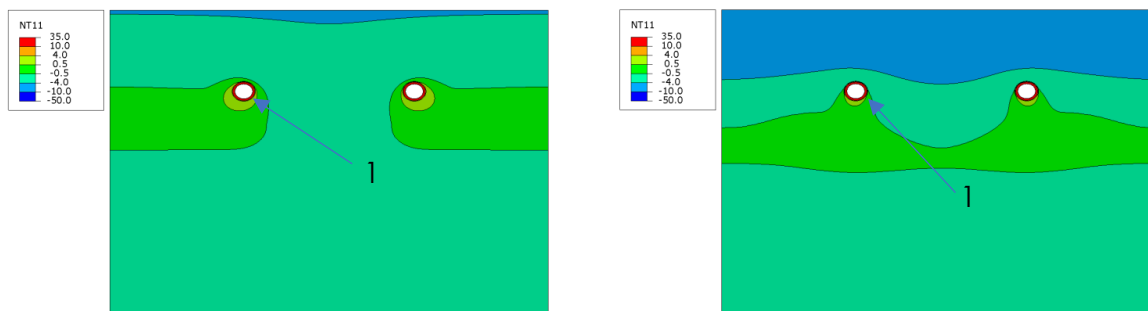


Рис. 1. Пример распределения полей температуры в массиве пород, контактирующих с подземной частью трубопровода: 1 – трубопровод

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОСХОДЯЩЕГО ГАЗОЖИДКОСТНОГО ПОТОКА С ПЕНООБРАЗУЮЩИМИ ПОВЕРХНОСТНО-АКТИВНЫМИ ВЕЩЕСТВАМИ В ВЕРТИКАЛЬНОМ КАНАЛЕ

Мусакаев Н. Г.^{1, 2}, Бородин С. Л.^{1, 2}, Огай В. А.¹, Юшков А. Ю.¹

¹ Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия

² Тюменский филиал Института теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН, Тюмень, Россия

В работе на экспериментальном стенде, имитирующем участок ствола газовой скважины и способного создавать пенные потоки в вертикальном сегменте трубопровода, проведены исследования установившихся газожидкостных потоков с различными типами водных растворов поверхностно-активных веществ. На основе методов и уравнений механики многофазных систем предложена математическая модель, описывающая восходящее течение такой смеси в вертикальном канале.

На сегодняшний день на ряде месторождений природного газа из-за выработки запасов существенным образом снижено давление в пласте, вследствие чего в газонасыщенную часть залежи активно внедряется пластовая вода. Соответственно возникают осложняющие добычу газа проблемы, связанные со скоплением воды на забое и приводящих, в конечном счете, к явлению, получившему в практике разработки газовых месторождений название режим «самозадавливания» скважин [1, 2]. Для стабильной эксплуатации таких скважин применяют различные геолого-технические мероприятия, например, для снижения негативного влияния вышеуказанных проблем в скважину закачивают пенообразующие поверхностно-активные вещества (ПАВ). Такая технология имеет относительно невысокий объем капитальных вложений, отличаясь при этом эффективностью [2, 3]. Так как технология эксплуатации газовых скважин с применением ПАВ становится всё более распространённой, то актуальным является исследование восходящего газожидкостного потока, которое позволит найти распределение основных параметров по высоте скважины при различных режимах эксплуатации добывающих скважин.

В работе для детального изучения восходящего газожидкостного течения в каналах произведена модернизация экспериментального стенда, имитирующего участок ствола газовой скважины и способного создавать пенные потоки в вертикальном сегменте трубопровода, изменяя значения давления и температуры, расхода жидкости и газа. Измерение поверхностного натяжения водных растворов подобранных пенообразователей с целью определения значения критической концентрации мицелл производилось методом отрыва кольца. На разработанном стенде проведены экспериментальные исследования установившихся газожидкостных потоков с различными типами водных растворов ПАВ (тип ПАВ и его концентрация в растворе). На основе методов и уравнений механики многофазных систем [4, 5] предложена математическая модель, описывающая восходящее течение газожидкостной смеси в вертикальном канале. При этом используются модельные константы, найденные в ходе экспериментальных исследований.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 20-41-720002).

Литература

1. Изюмченко Д. В., Мандрик Е.В., Мельников С.А., Плосков А. А., Моисеев В. В., Харитонов А. Н., Памужак С. Г. Эксплуатация газовых скважин в условиях активного водо- и пескопроявления // Вестник газовой науки. – 2018. – № 1 (33). – С. 235–242.
2. Юшков А.Ю., Огай В. А., Портнягин Н.Е. Экспериментальный стенд для исследования газожидкостных потоков и потоков пены // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. – 2019. – № 3. – С. 86–95.
3. Корякин А.Ю. Комплексные решения задач разработки и эксплуатации скважин Уренгойского добывающего комплекса. – М.: РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина, 2016. – 272 с.
4. Нигматулин Р. И. Динамика многофазных сред. М.: Наука, 1987.
5. Губайдуллин А. А., Мусакаев Н.Г., Бородин С.Л. Математическая модель восходящего газожидкостного потока в вертикальной скважине // Вестник Тюменского государственного университета. – 2010. – № 6. – С.68–75.

ВИДОИЗМЕНЕННАЯ ЗАДАЧА ДИРИХЛЕ ДЛЯ ВЫРОЖДАЮЩЕГОСЯ МНОГОМЕРНОГО АНАЛОГА СИСТЕМЫ БИЦАДЗЕ

Абдрахманов А. М., Абдрахманова Р. П.

Уфимский государственный авиационный технический университет
Уфа, Россия

Для вырождающегося многомерного аналога системы А. В. Бицадзе рассматривается видоизмененная задача Дирихле. В зависимости от характера вырождения приведены условия разрешимости рассматриваемой задачи.

The modified Dirichlet problem is considered for a degenerating multidimensional analogue of the A.V. Bitsadze system. The conditions for the solvability of the problem under consideration are given depending on the nature of the degeneration.

Рассмотрим следующую систему

$$-(x_1^2 + x_2^2 + \dots + x_n^2)\Delta u_j + \lambda \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\sum_{k=1}^n \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) = 0, j = 1, 2, \dots, n \quad (1)$$

Система (1) эллипична везде, кроме точки $x_1 = x_2 = \dots = x_n = 0$ и n -мерной сферы $x_1^2 + x_2^2 + \dots + x_n^2 = \lambda$, где система (1) вырождается.

При $n = 2$ и $\lambda = 2$ система (1) является системой А. В. Бицадзе.

Пусть область $D = \{X \in \mathbb{R}^n: x_1^2 + x_2^2 + \dots + x_n^2 < R^2\}, R^2 > \lambda$.

Рассматривается задача Дирихле для системы (1) в следующей постановке: найти регулярное в области D ограниченное решение системы (1), удовлетворяющее на границе $\Gamma = \{X: x_1^2 + x_2^2 + \dots + x_n^2 = R^2\}$ условиям

$$u_j|_{\Gamma} = f_j: f_j \in C^{2,\alpha}(\Gamma), j = 1, 2, \dots, n-1, \quad (2)$$

$$u_n|_{\delta\Gamma} = f_n: f_n \in C^{1,\alpha}(\delta\Gamma), \delta\Gamma = \{X: x_n = 0; x_1^2 + x_2^2 + \dots + x_{n-1}^2 = R^2\} \quad (3)$$

Доказано: задача (2), (3) для системы (1) разрешима, и ее решение единственно в классе функций, ограниченных на бесконечности.

В случае $R^2 < \lambda$ к краевым условиям (2), (3) необходимо добавить условие

$$\sum_{k=1}^n \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \Big|_{\Gamma} = f_{n+1}; f_{n+1} \in C^{1,\alpha}(\Gamma) \quad (4)$$

Доказано: задача (2), (3), (4) для системы (1) разрешима и ее решение единственно в классе ограниченных функций f_{n+1} .

Рассмотрим систему

$$-\Lambda(x_1, x_2, \dots, x_n) \Delta u_j + \lambda \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\sum_{k=1}^n \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) = 0, j = 1, 2, \dots, n$$

В случае $\Lambda(X) \neq 0$ найдены условия разрешимости видоизмененной задачи Дирихле.

ОБОБЩЕННЫЙ МНОГОМАСШТАБНЫЙ МЕТОД КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ДЛЯ ЗАДАЧИ ТЕРМОУПРУГОСТИ С ФАЗОВЫМ ПЕРЕХОДОМ

Аммосов Д. А.¹, Васильева М. В.^{1, 2}, Васильев В. И.¹, Тырылгин А. А.¹

¹ Северо-Восточный федеральный университет им. М. К. Аммосова
Якутск, Россия

² Техасский аграрно-технический университет, Колледж-Стейшен
США

Задача термоупругости с фазовым переходом играет важную роль при строительстве на многолетнемерзлых грунтах. Математическая модель состоит из системы уравнений для температуры и перемещений. Для аппроксимации на мелкой сетке используется метод конечных элементов. Для аппроксимации на грубой сетке применяется обобщенный многомасштабный метод конечных элементов. Представлены численные результаты и относительные погрешности многомасштабного метода.

The thermoelasticity problem with phase change plays a vital role in construction on permafrost soils. The mathematical model consists of a system of equations for temperature and displacement. For fine grid approximation, we use a finite element method. We use the Generalized Multiscale Finite Element Method for coarse grid approximation. Numerical results and relative errors of the multiscale method are presented.

Постановка задачи

Пусть $\Omega \subset \mathbb{R}^d$ ($d = 2, 3$) неоднородная область. Система уравнений для температуры T и перемещений u имеет следующий вид [1]:

$$(c\rho(T) + Dw'(T)) \frac{\partial T}{\partial t} - \nabla \cdot (k(T) \nabla T) = 0, \quad x \in \Omega, \quad t > 0, \quad (1)$$

$$\nabla(\mu \nabla du) + \nabla[(\lambda + \mu) \nabla \cdot du] + \nabla(\beta(T) d\phi(T)) = 0, \quad x \in \Omega, \quad t > 0,$$

где $c\rho(T) = \Theta_s(T)c_s\rho_s + \Theta_i(T)c_i\rho_i + \Theta_w(T)c_w\rho_w$ – объемная теплоемкость, $k(T) = k_s^{\Theta_s(T)} k_i^{\Theta_i(T)} k_w^{\Theta_w(T)}$ – теплопроводность, $\Theta_\alpha(T)$ – объемная доля фазы α , $w'(T)$ – производная функции содержания воды $w(T)$, λ и μ – параметры Ламе, $\phi(T)$ – пористость. Индексы s, i, w обозначают твердую матрицу, лед и воду, соответственно.

Система уравнений (1) дополняется следующими начальными условиями:

$$T = T_0, \quad u = u_0, \quad x \in \Omega, \quad t = 0, \quad (2)$$

и граничными условиями:

$$\begin{aligned} -k(T)\nabla T \cdot n &= 0, \quad x \in \Gamma_1, \quad -k(T)\nabla T \cdot n = \gamma(T - T_1), \quad x \in \Gamma_2, \\ \sigma \cdot n &= 0, \quad x \in \Gamma_3, \quad u = 0, \quad x \in \Gamma_4, \end{aligned} \quad (3)$$

где n – вектор внешней нормали $\partial\Omega$, $\Gamma_1 \cup \Gamma_2 = \Gamma_3 \cup \Gamma_4 = \partial\Omega$.

Численные результаты

Для аппроксимации на мелкой сетке применялся метод конечных элементов с линейными базисными функциями. Для аппроксимации на грубой сетке использовался обобщенный многомасштабный метод конечных элементов (GMSFEM) [2].

На рис. 1 представлено распределение температуры и перемещений по x_1 , x_2 , x_3 в последний момент времени для решений на мелкой и грубой сетках.

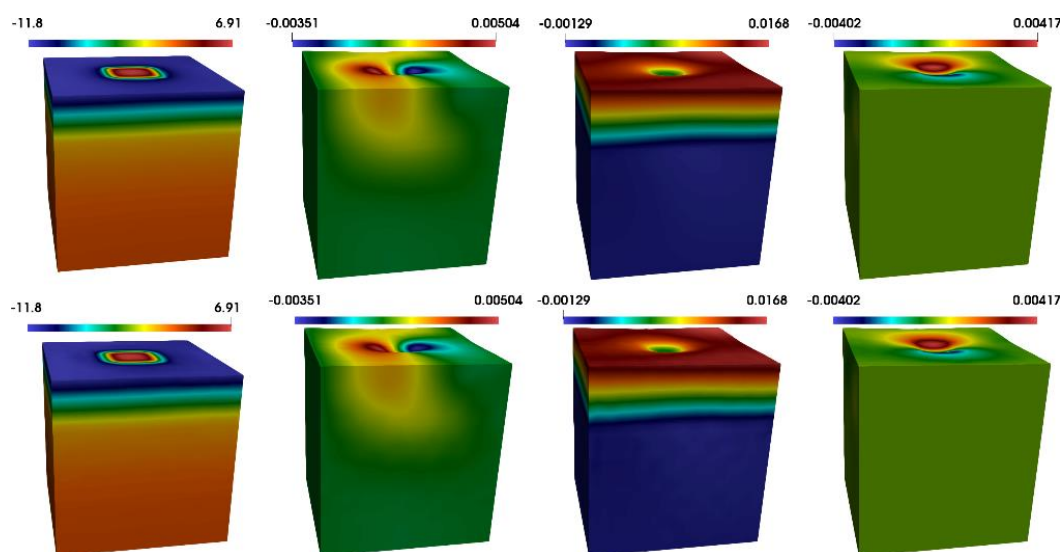


Рис. 1. Распределение температуры, перемещений по x_1 , x_2 , x_3 (слева направо) в последний момент времени. Первая строка – решение на мелкой сетке, вторая строка – многомасштабное решение на сетке $5 \times 5 \times 5$ с использованием 16 базисных функций

В таблице 1 представлены относительные L_2 и энергетические погрешности для температуры и перемещений на грубой сетке $5 \times 5 \times 5$ для различного количества базисных функций M . Из таблицы видно, что погрешности уменьшаются по мере увеличения количества базисных функций.

Таблица 1

Относительные L_2 и энергетические погрешности для температуры и перемещений. Количество степеней свободы на мелкой сетке $\text{DOF}_f = 70304$

M	DOF _c	Температура		Перемещения	
		$\varepsilon_{L_2}^T(\%)$	$\varepsilon_e^T(\%)$	$\varepsilon_{L_2}^u(\%)$	$\varepsilon_e^u(\%)$
1	1080	14.658	41.103	28.788	33.508
2	2160	10.618	32.978	20.591	26.837
4	4320	5.875	23.61	10.293	20.723
8	8640	3.108	13.794	6.168	15.232
16	17280	1.773	9.542	2.825	9.866

Заключение

Численные результаты показывают, что предложенный многомасштабный метод может обеспечить точную аппроксимацию решения задачи термоупругости с фазовым переходом на мелкой сетке при значительном снижении количества степеней свободы.

Литература

1. Vasilyeva M., Ammosov D., Vasil'ev V. Finite Element Simulation of Thermo-Mechanical Model with Phase Change // Computation. MDPI AG – 2021. – Vol. 9, № 1. – P. 5.
2. Efendiev Y., Galvis J., Hou T. Y. Generalized multiscale finite element methods (GMsFEM) // Journal of Computational Physics. – 2013. – V. 251. – Pp. 116-135.

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОВОГО ПРОЦЕССА ЭЛЕКТРОМУФТОВОЙ СВАРКИ ПОЛИЭТИЛЕНОВЫХ ТРУБ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ ВОЗДУХА

Аммосова О. А., Старостин Н. П.
Институт проблем нефти и газа СО РАН
Якутск, Россия

В разработанной ранее технологии электромуфтовой сварки полиэтиленовых труб при низких температурах предлагается исключить использование теплоизоляционного материала. Для обеспечения охлаждения сварного соединения по закономерности, характерной для сварки в условиях допустимой температуры, предлагается управлять остыванием зоны термического влияния закладным нагревателем. Приводятся результаты расчетов теплового процесса, подтверждающие эффективность предлагаемого способа охлаждения сварного соединения при температурах воздуха ниже нормативных.

It is proposed to exclude heat-insulating material in the previously developed technology of electrofusion welding of polyethylene pipes at low temperatures. It is suggested to control cooling of heat-affected zone with built-in heater to ensure cooling of the welded joint according to patterns that are distinctive for welding at permissible temperature. Results of thermal process calculations are presented, confirming effectiveness of proposed method of cooling welded joint at air temperatures below standard.

Согласно нормативным документам минимальная допустимая температура окружающего воздуха для выполнения сварных соединений полиэтиленовых труб с помощью соединительных деталей с закладным нагревателем указывается в стандарте продукции и составляет -5°C [1]. При более низких температурах сварочные работы выполняются в помещениях (укрытиях), обеспечивающих температуру из допустимого интервала. При этом минимальное время кондиционирования труб и соединительных деталей при допустимой для сварки температуре составляет от 1 до 16 часов в зависимости от номинальной толщины стенки трубы, что недопустимо при выполнении ремонтных работ на газопроводах в зимний период. Нами разработана технология сварки с закладным нагревателем, обеспечивающая в зоне термического влияния (ЗТВ) при температуре ниже нормативной динамику температурного поля, характерную для сварки при допустимой температуре [2]. Для обеспечения необходимого теплового режима при охлаждении ЗТВ используется слой теплоизоляционного материала различной толщины, зависящей от типоразмера свариваемой трубы и температуры окружающего воздуха. При полученном тепловом режиме формируется структура материала сварного шва, обуславливающая необходимую длительную прочность соединения.

В данной работе рассматривается возможность исключения при сварке в условиях низких температур использования теплоизоляции на стадии охлаждения. На основе математического моделирования теплового процесса сварки проводится анализ динамики температурных полей при различных температурах окружающего воздуха. Показано, что предварительным подогревом с помощью закладного нагревателя и последующего выравнивания температур путем свободного охлаждения, в ЗТВ можно получить практически однородное распределение с температурой из допустимого интервала. Оплавление свариваемых поверхностей производится нагревателем по существующему режиму, как при допустимой температуре воздуха. Установлено, что управлять охлаждением ЗТВ соединения при низких температурах можно, подавая на закладной нагреватель невысокое напряжение. Расчетами теплового процесса сварки с варьированием значений определено напряжение, подаваемое на клеммы электромудфы, при котором динамика температурного поля в ЗТВ получается практически идентичной динамике при допустимой температуре окружающего воздуха. Прочность полученного соединения не будет уступать прочности соединения, выполненного при допустимой температуре.

Работа выполнена в рамках проекта АААА-А21-121011590012-9.

Литература

1. ГОСТ Р ИСО 12176-2-2011. Трубы и фитинги пластмассовые. Оборудование для сварки полиэтиленовых систем. Часть 2. Сварка с закладными нагревателями.
2. Starostin N.P., Vasileva M.A., Ammosova O.A. Management of thermal process for polyethylene gas pipes welding with built-in heater // Journal of Physics: Conference Series. – 2019. – Vol. 1392. – 012086.

УРАВНЕНИЯ С ДРОБНОЙ ПРОИЗВОДНОЙ И МЕНЯЮЩИМСЯ «НАПРАВЛЕНИЕМ ВРЕМЕНИ»

Артюшин А. Н.

Институт математики им. С. Л. Соболева СО РАН
Новосибирск, Россия

Для эллиптического-параболических уравнений хорошо известна краевая задача Фикера. В докладе обсуждается обобщение такой постановки для уравнений с дробной производной.

For elliptic-parabolic equations the boundary value problem of Fichera type is well known. We consider the generalization of this problem for fractional diffusion equation.

В работе [1] был предложен подход, позволивший доказать разрешимость начально-краевой задачи для вырождающегося уравнения дробной диффузии. Естественным образом возникает вопрос о возможности обобщения этого подхода для более общих уравнений. А именно, нас интересует случай, когда коэффициент при дробной производной может менять знак. Оказывается, что по сравнению с эллиптическо-параболическими уравнениями ситуация более сложная. Тем не менее, можно доказать, что при определенных условиях обобщенное решение соответствующей задачи существует. В некоторых случаях удается также доказать и единственность такого решения.

Литература

1. Артюшин А. Н. Интегральные неравенства с дробной производной и их приложение к вырождающимся дифференциальным уравнениям с дробной производной Капуто // Сиб. Мат. Журнал. Т. 61, №. 2 (2020), 266-282.

О НЕКОТОРЫХ КЛАССАХ ОБРАТНЫХ ЗАДАЧ С ТОЧЕЧНЫМ ПЕРЕОПРЕДЕЛЕНИЕМ ДЛЯ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА

Баранчук В. А., Пятков С. Г.
Югорский государственный университет
Югра, Россия

Мы рассматриваем вопрос о корректности обратных задач об определении коэффициентов параболической системы по точечным данным переопределения. Получены теоремы существования и единственности решений.

We examine the well-posedness questions for inverse problems of recovering coefficients of parabolic system with the use of pointwise overdetermination conditions. The uniqueness and existence theorems are established

Мы рассматриваем обратные задачи с точечным переопределением для параболической системы вида

$$L_u = u_t + A(t, x, D)u = f(x, t), (t, x) \in Q = (0, T) \times G, G \subset \mathbb{R}^n, \quad (1)$$

где

$$A(t, x, D)u = - \sum_{i,j=1}^n a_{i,j}(t, x) u_{x_i x_j} + \sum_{i=1}^n a_i(t, x) u_{x_i} + a_0(t, x) u,$$

область G – с границей $\Gamma \in C^2$. Система (1) дополняется начальными и граничными условиями

$$u|_{t=0} = u_0, Bu|_{S=g} = u_0, S = (0, T) \times \Gamma, \quad (2)$$

где $Bu = \sum_{i=1}^n \gamma_i(t, x) u_{x_i} + \gamma_0(t, x) u$. Условия переопределения записываются в виде:

$$\langle u(x_i, t), e_i \rangle = \psi_i(t), i = 1, 2, \dots, r, \quad (3)$$

где $\langle \cdot, \cdot \rangle$ – скалярное произведение в $\mathbb{C}^h$, $\{e_i\}$ – некоторый набор векторов единичной длины и, вообще говоря, как среди точек $\{x_i\}$, так и среди векторов $\{e_i\}$ могут быть совпадающие. Правая часть имеет вид $f = \sum_{i=1}^m f_i(x, t) q_i(t) + f_0(x, t)$. Задача состоит в определении неизвестных функций $q_i(t)$, входящих в правую часть и в сам оператор A в качестве коэффициентов, и решения u системы (1), удовлетворяющего условиям (2), (3) (см. [1]).]. Условие (3) обобщает часто рассматриваемые точечные условия переопределения вида $u(x_i, t) = \psi_i(t)$. Проблемы подобного вида возникают при описании процессов теплопереноса, диффузионных процессов, процессов фильтрации и во многих других областях. В приложениях такая ситуация также возникает. Ранее, задача 1-3 была изучена в случае, когда x_i являются внутренними точками области G и заданы условия вида $u(x_i, t) = \psi_i(t)$.

Далее, мы считаем, что параметр $p > n + 2$ зафиксирован. Пусть $B_\delta(x_i)$ – шар радиуса δ с центром в точке x_i (см. условие (3)). Параметр $\delta > 0$ назовем допустимым, если $\overline{B_\delta(x_i)} \subset G$ для внутренних точек $x_i \in G, \overline{B_\delta(x_i)} \cap \overline{B_\delta(x_j)} = \emptyset$ для $x_i \neq x_j, i, j = 1, 2, \dots, r$ и для любой точки $x_i \in \Gamma$ найдется окрестность U (координатная окрестность) этой точки.

Наложим условия на коэффициенты операторов A и B : $i = 1$ найдется допустимое $\delta > 0$ такое, что

$$a_{ij} \in C(\bar{Q}), a_k \in L_p(Q), \gamma_k \in C^{1/2,1}(\bar{S}), a_{ij} \in L_\infty(0, T; W_\infty^1(G_\delta)); \quad (4)$$

$$a_k \in L_p(0, T, W_p^1(G_\delta)), i, j = 1, 2, \dots, n, k = 0, 1, \dots, n. \quad (5)$$

Дополнительно мы также предположим, что существует постоянная $\varepsilon_1 > 0$ такая, что

$$\operatorname{Re}(-A_0(t, x, \xi)\eta, \eta) \geq \varepsilon_1 |\xi|^2 |\eta|^2 \forall \xi \in \mathbb{R}^n, \eta \in \mathbb{C}^h, \quad (6)$$

Считаем, что

$$|\det(\sum_{i=1}^n \gamma_i v_i)| \geq \varepsilon_0 > 0, \quad (7)$$

где ν – внешняя единичная нормаль к Γ и ε_0 – некоторая положительная постоянная. Основные условия на данные имеют вид

$$u_0(x) \in W_p^{2-\frac{2}{p}}(G), g \in W_p^{2k_0, k_0}(S), B(x, 0)u_0(x)|_\Gamma = g(x, 0) \quad \forall x \in \Gamma, \quad (8)$$

где $k_0 = 1/2 - 1/2p$. Фиксируем допустимое $\delta > 0$. Построим функции $\varphi_i(x) \in C_0^\infty(\mathbb{R}^n)$ такие, что $\varphi_i(x) = 1$ в $B_{\delta/2}(x_i)$ и $\varphi_i(x) = 0$ в $\mathbb{R}^n \setminus B_{3\delta/4}(x_i)$, положим $\varphi(x) = \sum_{i=1}^r \varphi_i(x)$.

Дополнительно предположим, что

$$\varphi(x)u_0(x) \in W_p^{3-2/p}(G), \varphi g \in W_p^{k_1, 2k_1}(S) \quad (k_1 = 1 - 1/2p), \quad (9)$$

Обозначим через U_i координатные окрестности, отвечающие точкам x_i ($i = 1, \dots, r$). Мы предположим, что

$$\Gamma \in C^2, S_\delta \in C^3. \quad (10)$$

Оператор A предполагается представимым в виде

$$A = L_0 - \sum_{i=m+1}^r q_i(t) l_i, L_0 u = - \sum_{i,j=1}^n a_{ij}(t, x) u_{x_i x_j} + \sum_{i=1}^n a_i(t, x) u_{x_i} + a_0(t, x) u, \\ l_i u = \sum_{j=1}^n b_{ij}(x, t) u_{x_j} + b_{i0}(x, t) u. \quad (11)$$

Таким образом, мы ищем решение u и функции $q = (q_1, q_2, \dots, q_r)$ такие, что выполнены равенства (1)–(3). Нам также необходимо условие: (B) Пусть существует $\delta_0 > 0$ такое, что

$$|\det B(t)| \geq \delta_0 \text{ п.в. на } (0, T)$$

Остальные используемые коэффициенты удовлетворяют условиям

$$a_{ij} \in C(\bar{Q}), a_k \in L_p(Q), \gamma_k \in C^{1/2,1}(\bar{S}) \cap C^{1,2}(\bar{S}_\delta), a_{ij} \in L_\infty(0, T; W_\infty^1(G_\delta)), \quad (12)$$

$$a_k \in L_p(Q) \cap L_p(0, T; W_p^1(G_\delta)), i, j = 1, 2, \dots, n, l = 0, 1, \dots, n. \quad (13)$$

Теперь мы можем сформулировать наш основной результат.

Теорема 2. Пусть выполнены условия параболичности и Лопатинского (см. определения в гл. 7 в [2]), и условия (4)–(13), (39), (B) для некоторого допустимого $\delta > 0$ и $p > n + 2$. Тогда для некоторого числа $\gamma_0 \in (0, T)$, на интервале $(0, \gamma_0)$ существует единственное решение $(u, q_1, q_2, \dots, q_r)$ (1)–(3), такое что $u \in L_p(0, \gamma_0; W_p^2(G)), u_t \in L_p(Q^{\gamma_0}), \varphi u \in L_p(0, \gamma_0; W_p^3(G)), \varphi u_t \in L_p(0, \gamma_0; W_p^1(G)), q_i(t) \in L_p(0, \gamma_0), i = 1, \dots, r$.

Литература

1. Прилепко А. И., Соловьев В. В. Теоремы разрешимости и метод Ротэ в обратных задачах для уравнения параболического типа // Дифференц. уравнения. 1987. Т.23, №10. С.1791-1799.
2. Ладыженская О. А., Солонников В. А., Уральцева Н. Н. Линейные и квазилинейные уравнения параболического типа, Наука, Москва, 1967.

РАЗРЕШИМОСТЬ ЗАДАЧ СОПРЯЖЕНИЯ ТИПА НЕИДЕАЛЬНОГО КОНТАКТА В ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ОБЛАСТИ

Белоногов В. А.

Югорский государственный университет
Ханты-Мансийск, Россия

В работе рассматривается вопрос о регулярной разрешимости в пространствах Соболева задач сопряжения для параболических систем второго порядка в цилиндрической пространственной области с условиями сопряжения типа неидеального контакта. Решение имеет все обобщенные производные входящие в

уравнение, суммируемые с некоторой степенью $p \in (1, \infty)$. Задача не входит в класс классических задач дифракции и возникает при описании процессов тепломассопереноса в слоистых средах.

In the article we examine the questions of regular solvability in the Sobolev spaces of the transmission problems with transmission conditions of imperfect contact type for parabolic second order systems in cylindrical space domains. A solution has all generalized derivatives occurring in the system summable to some power $p \in (1, \infty)$. The problem does not belong to the class of classical diffraction problems and arises when describing heat-and-mass transfer processes in layered media.

Мы рассматриваем параболическую систему второго порядка вида

$$Mu = u_t - Lu = f(x, t), (x, t) \in Q = G \times (0, T), \quad (1)$$

где $Lu = a_{nn}(t, x)u_{x_n x_n} + \sum_{i,j=1}^{n-1} a_{ij}(t, x)u_{x_i x_j} - \sum_{i,j=1}^{n-1} a_i(t, x)u_{x_i} - a_0(t, x)u$, $G \subset \mathbb{R}^n$ – ограниченная область с границей Γ вида $G = \Omega \times (0, l)$, $(\partial\Omega \in C^2)$ a_{ij}, a_i, a_0 – $h \times h$ – матрицы-функции. Пусть $G^i = \Omega \times (l_{i-1}, l_i)$, $Q^i = G^i \times (0, T)$, где $l_0 = 0 < l_1 < \dots < l_m = l$. Считаем, что все коэффициенты могут иметь разрывы первого рода при переходе через точки $x_n = l_i$, где у нас задаются условия сопряжения. Уравнение (1) дополняется начальными и краевыми условиями:

$$Ru|_{S_0} = \varphi, S_0 = (0, T) \times \partial\Omega \times (0, l), \quad (2)$$

где $Ru = u$ или $Ru = \sum_{i,j=1}^{n-1} a_{ij}u_{x_i x_j} + \sigma u$;

$$u(0, x) = u_0(x) (x \in G), R_0 u(t, x', 0) = \varphi_0, R_1 u(t, x', l) = \varphi_1, \quad (3)$$

где $R_0 u = u$ или $R_0 u = -u_{x_n} + \sigma_0 u$, соответственно $R_1 u = u$ или $R_1 u = u_{x_n} + \sigma_1 u$, а также условиями сопряжения:

$$R_i^+ u = (u_{x_n} - \alpha_i^1(t, x')u)|_{x_n=l_i+0} - \alpha_i^2(t, x')u|_{x_n=l_i-0} = g_i^+, \quad (4)$$

$$R_i^- u = (u_{x_n} - \beta_i^1(t, x')u)|_{x_n=l_i-0} - \beta_i^2(t, x')u|_{x_n=l_i+0} = g_i^-, i = 1, 2, \dots, m-1. \quad (5)$$

Постановка отличается от стандартной постановки задачи дифракции. Задачи типа дифракции в общей постановке для параболических систем высокого порядка были рассмотрены в работе в пространствах Соболева и Гельдера. Обобщенная разрешимость задачи (1)-(5) в случае произвольной области G была рассмотрена в работах. Мы рассматриваем вопрос о регулярной разрешимости задачи (1)-(5).

Приведем условия на данные задачи. Пусть $A_0(t, x, \xi) = a_{nn}\xi_n^2 + \sum_{i,j=1}^{n-1} a_{ij}(t, x)\xi_i \xi_j$ ($\xi \in \mathbb{R}^n$). Мы предполагаем, что у нас выполнено условие нормальной сильной эллиптичности: существует постоянная $\delta_0 > 0$ такая, что

$$Re \langle A_0(t, x, \xi)\eta, \eta \rangle \geq \delta_0 |\xi|^2 |\eta|^2 \forall \xi \in \mathbb{R}^n, \eta \in \mathbb{C}^h; \quad (6)$$

$$Re \sum_{i,j=1}^n \langle a_{ij}(t, x)(\xi_i u + \eta_i v), \xi_j u + \eta_j v \rangle \geq \delta_0 |Im \langle u, v \rangle| \forall (t, x) \in Q, \quad (7)$$

для всех $u, v \in \mathbb{C}^h, \xi, \eta \in \mathbb{R}^n$ таких что $\langle \xi, \eta \rangle = 0, |\xi| = |\eta| = 1$.

Запишем условия на коэффициенты. Далее, считаем, что в условиях ниже $\varepsilon_0 \in (0, 1/2)$ – некоторый фиксированный параметр (он может быть как угодно малым). Считаем, что

$$a_i \in L_q(Q), a_0 \in L_r(Q), a_{ij} = a_{ji}, a_{ij} \in C(Q^k) (i, j = 1, \dots, n), \quad (8)$$

где $q > n + 2$ при $p \leq n + 2$ и $q = p$ при $p > n + 2$, $r > (n + 2)/2$ при $p \leq (n + 2)/2$ и $r = p$ при $p > (n + 2)/2$, и функции $a_{ij}|_{Q^k}$ допускают продолжение до непрерывных функций класса $C(\overline{Q^k})$ ($k = 1, \dots, m$). Вообще говоря, функции a_{ij} могут допускать при переходе через плоскости $x_n = l_k$ разрывы первого рода. Далее предположим, что

$$\alpha_i^k(x', t), \beta_i^k(x', t) \in C^{S_0+\varepsilon_0, 2S_0+2\varepsilon_0}(\overline{Q^0}) (k = 1, 2; i = 1, 2, \dots, m-1), Q^0 = \Omega \times (0, T); \quad (9)$$

$$\sigma \in C^{S_0+\varepsilon_0, 2S_0+2\varepsilon_0}(S_i), S_i = (0, T) \times \partial\Omega \times (l_{i-1}, l_i), \quad (10)$$

и $\sigma|_{S_i}$ допускают продолжение до функции класса $C^{S_0+\varepsilon_0, 2S_0+2\varepsilon_0}(\overline{S_i})$.

$$\sigma_0, \sigma_1 \in C^{S_0+\varepsilon_0, 2S_0+2\varepsilon_0}(\overline{Q^0}). \quad (11)$$

$$u_0(x) \in \cap_{i=1}^m W_p^{2-2/p}(G^i), \varphi \in \cap_{i=1}^m W_p^{k_0, 2k_0}(S_i), \quad (12)$$

где $S_i = \Gamma_i \times (0, T)$, $\Gamma_i = \partial\Omega \times (l_{i-1}, l_i)$; $k_0 = 1 - 1/2p$, если $Ru = u$ и $k_0 = 1/2 - 1/2p$ в противном случае.

$$\varphi_0 \in W_p^{k_1, 2k_1}(Q^0), \varphi_1 \in W_p^{k_2, 2k_2}(Q^0), \quad (13)$$

где $k_1 = 1 - 1/2p$, если $R_0u = u$ и $k_1 = 1/2 - 1/2p$ в противном случае, и, аналогично, $k_2 = 1 - 1/2p$, если $R_1u = u$ и $k_2 = 1/2 - 1/2p$ в противном случае. Пусть также

$$g_i^\pm \in W_p^{s_0, 2s_0}(Q^0); i = 1, 2, \dots, m-1. \quad (14)$$

В случае $Ru \neq u$ дополнительно потребуем, чтобы

$$a_{ij}|_{Q^k} \in C^{s_0+\varepsilon_0, 2s_0+2\varepsilon_0}(Q^k) \quad (i, j = 1, \dots, n, k = 1, \dots, m) \quad (15)$$

и $a_{ij}|_{Q^k}$ допускают продолжение до функций класса $C^{s_0+\varepsilon_0, 2s_0+2\varepsilon_0}(\overline{Q^k})$.

Теорема. Пусть $p \neq 3/2, p \neq 3$, выполнены условия (8)-(15), условие (6) если $Ru = u$ и (6), (7) если $Ru \neq u$ и условия согласования данных (их можно сформулировать используя теоремы вложения).

Тогда существует единственное решение задачи (1)-(5) такое, что $u \in \cap_{i=1}^m W_p^{1,2}(Q^i)$.

Литература

1. Ладыженская О.А. Уралыцева Н.Н. Солонников В.А. Линейные и квазилинейные уравнения параболического типа (Москва: Наука, 1968).
2. Житарашу Н.В. Шаудеровские оценки и разрешимость общих краевых задач для общих параболических систем с разрывными коэффициентами, Докл. АН СССР. 169 (3), 511-514 (1966).
3. Номировский Д.А. Обобщенная разрешимость параболических систем с неоднородными условиями сопряжения типа неидеального контакта, Дифференц. уравнения. 40 (10), 1390-1399 (2004).
4. B.S. Jovanovi, L.G. Vulkov, Formulation and analysis of a parabolic transmission problem on disjoint intervals, Publications De L'Institut Mathematique. Nouvelle serie, 91 (2012), 111-123.

ОСОБЕННОСТИ ЛИНЕЙНЫХ ВОЛН В ПОРИСТЫХ СРЕДАХ С ГАЗОВЫМИ ГИДРАТАМИ

Болдырева О. Ю., Губайдуллин А. А., Дудко Д. Н.

Тюменский филиал Института теоретической и прикладной механики
им. С. А. Христиановича СО РАН
Тюмень, Россия

Значительная доля углеводородов в недрах Земли представлена газовыми гидратами. Природные гидратосодержащие пласты могут различаться по многим параметрам: пористости, проницаемости, структуре порового пространства, содержанию гидрата и составу поровых флюидов, особенностям залегания и т. п. Так, например, лабораторные наблюдения показывают наличие различных механизмов образования и нахождения газовых гидратов в пористом образце: частицы гидрата могут образовываться и находиться в поровой жидкости или на поверхности гранул скелета породы. Как это влияет на поведение волн, изучено недостаточно. Подобные исследования требуют построения адекватных математических моделей и компьютерного моделирования с учетом данных лабораторных и натурных экспериментов. Основными методами разведки и изучения газогидратных залежей являются сейсмические исследования и акустический каротаж, поэтому значительный интерес представляют исследования особенностей волновых процессов в газогидратных пластах.

В настоящей работе выполнен обзор существующих математических моделей пористых сред, содержащих газовые гидраты. Проведен линейный анализ распространения возмущений давления в гидратосодержащей пористой среде. Выполнено

сопоставление полученных расчетных данных с экспериментальными данными по измерению скоростей звука в пористых образцах с различным содержанием газового гидрата [1, 2]. Изучены особенности линейных волн в гидратосодержащей пористой среде в зависимости от свойств основной породы, насыщающего флюида и степени заполнения порового пространства газовым гидратом.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Тюменской области в рамках научного проекта № 20-41-720003.

Литература

1. Дучков А.Д., Дучков А. А., Дугаров Г.А., Дробчик А. Н. Скорости ультразвуковых волн в песчаных образцах, содержащих воду, лед или гидраты метана и тетрагидрофурана (лабораторные измерения) // ДАН. – 2018. – Т.78, № 1. – С. 94– 99.
2. Bu Q.T., Hu G.W., Ye Y.G., Liu C.L., Li C.F., Best A.I. and Wang J.C. The elastic wave velocity response of methane gas hydrate formation in vertical gas migration systems // J. Geophys. Eng. – 2017. – Vol. 14, – Pp. 555–569.

ВЕРИФИКАЦИЯ МЕТОДА ОПРЕДЕЛЕНИЯ МАССОВОГО РАСХОДА ПО ЗАМЕРАМ ДАВЛЕНИЯ НА УСТЬЕ СКВАЖИНЫ ПРИ ОБРАЗОВАНИИ ГИДРАТОВ ПРИРОДНОГО ГАЗА

Борисова Н. Н.¹, Рожин И. И.²

¹ Северо-Восточный федеральный университет им. М. К. Аммосова

² Институт проблем нефти и газа СО РАН, Якутск, Россия

Для контроля процесса добычи газа и управления им необходимо знать связь между количеством поступающего газа, давлением и температурой на забое, т. е. там, где газ поступает в скважину. Именно в скважине происходит интенсивное охлаждение газа за счет дросселирования при снижении давления (изоэнтальпический процесс применительно к добыче и транспорту газа [1]) и за счет теплообмена с окружающими скважину многолетнемерзлыми горными породами. Так как многие месторождения в северных регионах имеют достаточно высокие пластовые давления, то при этом возникает опасность образования газовых гидратов. Образование гидратов в призабойной зоне приводит к снижению продуктивности скважин, а в стволе скважин – к снижению их пропускной способности, либо к их полной закупорке. Опасность закупорки скважин газовыми гидратами возникает и при их остановке из-за низкой температуры окружающих горных пород [2].

Для описания образования и отложения гидратов в скважине используется квазистационарная математическая модель [2–4], в которой движение реального газа в трубах описывается в рамках трубной гидравлики, а динамика образования гидрата – в рамках обобщенной задачи Стефана, в которой температура фазового перехода «газ+вода – гидрат» зависит от давления в потоке газа.

Вычисления выполнялись при следующих значениях параметров, соответствующих Отраднинскому газоконденсатному месторождению Республики Саха (Якутия) [9]. Давление на устье скважины варьировалось от 11 МПа до 14 МПа.

Анализируя результаты расчетов, получено, что для Отраднинского месторождения образование гидратов в случае отсутствия ингибиторов возможно по всему стволу скважины, но наиболее интенсивно этот процесс идет в его верхней части, примерно соответствующей мощности многолетней мерзлоты. Полная закупорка устьевой части скважины может происходить приблизительно за 1÷2.5 часа в зависимости от падения давления. При этом на забое будет перекрыто 25–40% проходного сечения скважины.

Зная динамику изменения массового расхода во времени, можно контролировать изменение проходного сечения по всей скважине и в случае необходимости следует проводить мероприятия по предотвращению и удалению гидратов природного газа.

In the well gas is intensively cooled by throttling at reduced pressure (isenthalpic process for gas production and transport [1]) and by means of heat exchange caused by surrounding permafrost rocks. Since many deposits in the northern regions have fairly high reservoir pressures, there is a risk of gas hydrates formation. The formation of hydrates in the bottom-hole results in less productivity and lower capacity in the wells or in their total blockage. The risk of gas hydrates blocking the wells also occurs when they stop due to the low temperature of the surrounding rocks [2].

To describe the formation and deposition of hydrates in the well, a quasi-stationary mathematical model [2–4] is applied, in which movement of the real gas in the pipes is described within the tube hydraulics, while the dynamics of hydrate formation presented within the generalized Stefan problem, in which the temperature of the phase transition «gas+water – hydrate» depends on the pressure in the gas flow.

The calculations were carried out at the following parameter values corresponding to the Otradninsky gas condensate deposit of the Sakha Republic (Yakutia) [4]. The pressure at the wellhead ranged from 11 MPa to 14 MPa.

The analysis of the calculation results shows that in the Otradninsky deposit the formation of hydrates can be noted in the absence of inhibitors throughout the well, but more intensively this process takes place in its upper part, approximately corresponding to the permafrost capacity. The complete plugging of the wellhead can be observed approximately in 1÷2.5 hours depending on the pressure drop. At the same time, 25–40 % per cent of the well section will be covered on the bottom-hole.

Knowing the dynamics of changes in the mass flow rate over time, it is possible to control the change in the flow section throughout the well and, if necessary, measures should be taken to prevent and remove natural gas hydrates.

Литература

1. Чарный И. А., Основы газовой динамики. – М.: Гостоптехиздат, 1961.
2. Бондарев Э.А., Рожин И. И., Аргунова К. К., Обобщение алгоритма определения расхода по замерам давления в системах добычи и транспорта газа. – ПМТФ, 58(2017), №5, 111- 120.
3. Бондарев Э.А., Рожин И. И., Аргунова К. К., Моделирование образования гидратов в газовых скважинах при их тепловом взаимодействии с горными породами. – ИФЖ, 87(2014), №4, 871-878.
4. Бондарев Э.А., Воеводин А.Ф., Никифоровская В.С., Методы идентификации математических моделей гидравлики, Якутск: Издательский дом СВФУ, (2014).

НОВЫЕ СХЕМЫ РАСЩЕПЛЕНИЯ ДЛЯ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ЗАДАЧ

Вабищевич П. Н.

Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН

Москва, Россия

Академия наук Республики Саха (Якутия)

Якутск, Россия

Численное решение нестационарных краевых задач для уравнений с частными производными базируется на использовании, чаще всего, неявных аппроксимаций по времени, которые обеспечивают безусловную устойчивость по начальным данным и правой части. Явные схемы более просты для нахождения приближенного решения на новом слое, но имеют жесткие ограничения на шаги по времени. Целью многих исследований является построения схем, которые наследовали, в той или иной мере,

достоинства явных и неявных аппроксимаций: сохраняли бы устойчивость, но были бы более удобными для вычислительной реализации.

Упрощение задачи на новом слое без потери устойчивости достигается, в частности, использованием неоднородных аппроксимаций по времени. Широкое распространение получили явно-неявные схемы (IMEX методы). В этом случае оператор задачи расщепляется на два операторных слагаемых с выделением приемлемого для вычислительной реализации слагаемого, которое берется с верхнего слоя, а другое слагаемое – с нижнего слоя по времени. В работе [1] проведено исследование явно-неявных двух- и трехслойных операторно-разностных схем для эволюционного уравнения первого порядка как для стандартного расщепления основного оператора задачи, так и для расщепления оператора при производной решения по времени.

В схемах расщепления [2] используется аддитивное представление оператора задачи. Переход на новый слой по времени осуществляется решением эволюционных задач для отдельных операторных слагаемых. Во многих нестационарных задачах вычислительно приемлемые подзадачи имеет смысл строить на основе декомпозиции решения, когда более простые задачи формулируются для отдельных составляющих решения. Такие схемы расщепления решения построены в работе [3] для приближенного решения задачи Коши в конечномерном гильбертовом пространстве для эволюционного уравнения первого порядка.

Аналогично строятся схемы расщепления решения для эволюционных уравнений второго порядка. Декомпозиция решения проводится как на прямой сумме подпространств, так и на новом варианте, который связывается с аддитивным представлением единичного оператора на основе операторов ограничения и продолжения.

Схемы расщепления базируются на использовании явно-неявных аппроксимаций по времени при выделении диагональной части или треугольного расщепления соответствующей операторной матрицы. Устойчивость предложенных трехслойных схем расщепления решения исследуется с привлечением общих результатов теории устойчивости (корректности) операторно-разностных схем [4].

The numerical solution of nonstationary boundary value problems for partial differential equations is based on the use, most often, of implicit approximations in time, which provide unconditional stability concerning the initial data and the right-hand side. Explicit schemes are easier to find an approximate solution on a new level, but they have severe restrictions on time steps. Many studies aim to construct a scheme that inherited, to one degree or another, the advantages of explicit and implicit approximations. They would remain stable; still, they would be more convenient for computational implementation.

Simplification of the problem on a new layer without loss of stability is achieved, in particular, by using inhomogeneous approximations in time. Explicit-implicit schemes (IMEX methods) are widely used. In this case, the operator of the problem is split into two operator terms to select a term acceptable for computational implementation. This term is taken from the upper level and the other term – from the lower level in time. In [1], a study was carried out of explicitly implicit two- and three-level operator-difference schemes for the first-order evolution equation for the standard splitting of the main operator of the problem and the splitting of the operator at the time derivative of the solution.

In splitting schemes [2], an additive representation of the problem operator is used. The transition to a new level in time is carried out by solving evolutionary problems for individual operator terms. Many nonstationary problems make sense to build computationally acceptable subproblems based on solution decomposition when simpler problems are formulated for the solution's individual components. Such schemes for splitting the solution were constructed in [3] for an approximate solution of the Cauchy problem in a finite-dimensional Hilbert space for a first-order evolution equation.

The schemes for splitting the solution for second-order evolution equations are constructed similarly. The solution is decomposed both on the direct sum of subspaces and on

a new version, which is associated with the additive representation of the unit operator based on the constraint and continuation operators.

Splitting schemes are based on explicit-implicit approximations in time when extracting the diagonal part or triangular splitting of the corresponding operator matrix. The stability of the proposed three-layer splitting schemes for the solution is investigated using the general results of the theory of stability (correctness) of operator-difference schemes [4].

Литература

1. Vabishchevich P.N. Explicit-implicit schemes for first-order evolution equations // Differential Equations. 2020, Vol. 56, No. 7, P. 882–889.
2. Vabishchevich P.N. Additive Operator-Difference Schemes: Splitting Schemes. De Gruyter, Berlin, 2014.
3. Efendiev Y., Vabishchevich P.N. Splitting methods for solution decomposition in nonstationary problems // Applied Mathematics and Computation. 2021, Vol. 397, No. 125785, P. 1–10.
4. Samarskii A.A. The Theory of Difference Schemes. Marcel Dekker, New York, 2001.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛООВОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ИНЖЕНЕРНЫХ СООРУЖЕНИЙ С КРИОЛИТОЗОНОЙ

Васильев В. И., Аммосов А. В.

Северо-Восточный федеральный университет им. М. К. Аммосова
Якутск, Россия

На сегодняшний день Россия занимает второе место в мире по добыче углеводородного сырья в мире, уступая только США. Благодаря обширной территории Россия обладает значительными запасами углеводородного сырья. Но при этом следует отметить, что значительная часть месторождений углеводородного сырья страны расположена в криолитозоне. Для их разработки приходится нести дополнительные затраты на решение инфраструктурных задач обустройства месторождений, разработку экологически безопасных технологий добычи углеводородного сырья и их транспорта. Кроме того, глобальное изменение климата приносит дополнительные сложности в строительство и эксплуатацию объектов нефтегазодобычи.

Для математического моделирования процессов теплопереноса с фазовыми переходами широко используется классическая модель Стефана с несколькими фронтами фазового перехода. Для численного решения таких задач наиболее эффективны разностные схемы сквозного счета.

Решение этих задач имеет огромное практическое значение, так как именно они необходимы для прогнозирования изменения теплового режима грунта при строительстве в условиях криолитозоны и во избежание проблем с последующей эксплуатацией.

В докладе будут представлены результаты численного исследования температурного взаимодействия инженерных сооружений с криолитозоной, в том числе, взаимодействие добывающих скважин углеводородного сырья с многолетнемерзлыми горными породами.

ОСОБЕННОСТИ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА В СКВАЖИНАХ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Васильева З. А.

Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И. М. Губкина
Москва, Россия

Получены зависимости температуры от давления в стволе вертикальной скважины, учитывающие особенности теплопереноса в низкотемпературных скважинах. Факторы, влияющие на термобарический режим скважины, отражены в замерах тем-

пературы и давления как минимум в трех точках. Полученные зависимости предлагается использовать для диагностики причин падения дебита скважин и для принятия мер по предупреждению гидратообразования.

Из характеристики термобарических условий перспективных месторождений Восточной Сибири следует, что для осуществления планов долгосрочной разработки месторождений нефти и газа Восточной Сибири и Арктического шельфа необходимо уже сейчас разрабатывать способы управления предупреждением гидратообразования в скважинах.

Для установившегося потока закон сохранения энергии в добывающей скважине имеет вид [1], [2]:

$$\frac{dT}{dx} + \frac{\pi d}{C_p} Q = \varepsilon \frac{dP}{dx} - \frac{1}{C_p} g \sin \theta, \quad (1)$$

где удельный тепловой поток $Q = k_D(T - T_e) = k_D \Delta T$ характеризуется коэффициентом теплопередачи k_D и разницей температур окружающей среды T_e и флюида T : ε – коэффициент Джоуля-Томпсона, C_p – изобарная теплоёмкость газа. θ – угол наклона скважины к горизонту, температура окружающей среды меняется линейно с глубиной:

Для скважин низкотемпературных залежей более существенным является эффект Джоуля-Томсона по сравнению с тепловым потоком в породе. В данной работе принимается постоянным тепловой поток, а не температура окружающих пород, как в [1] [2], что является более точным приближением. Тогда решение уравнения энергии (1) для стационарного газового потока в скважине ($0 < x < H$) с учетом предположения, что C_p, ε, Q – постоянные величины, имеет вид:

$$T(x) = T_s + \varepsilon_2 (P(x) - P_s) + \frac{k_D \cdot \pi D}{GC_p} \Delta T x - \frac{g \sin \theta}{C_p} x. \quad (2)$$

Выразим значение разности температур газа и окружающих пород через замеры температуры и давление на забое T_s, P_s , и на устье T_y, P_y :

$$\Delta T = \frac{GC_p}{k_D \cdot \pi DH} \left[\frac{g \sin \theta}{c_p} H - \varepsilon_2 (P_y - P_s) + (T_y - T_s) \right]. \quad (3)$$

При подстановке выражения (3) в решение уравнения энергии (2), распределение температуры в стволе скважины приобретает вид:

$$T(x) = T_s + \varepsilon_2 (P(x) - P_s) + \frac{x}{H} \left[\varepsilon_2 (P_s - P_y) + (T_y - T_s) \right]. \quad (4)$$

При наличии многолетнемерзлых пород для более точного расчета температуры необходимы замеры температуры T_l и давления P_l на подошве криолитозоны на глубине L . Распределение температуры в стволе вертикальной скважины рассчитывается аналогично по трем замерам и приобретает вид:

$$\text{при } 0 < x < L \quad T_1(x) = T_s + \varepsilon_2 (P(x) - P_s) + \frac{x}{L} \left[\varepsilon_2 (P_s - P_l) + (T_l - T_s) \right]; \quad (5)$$

$$\text{при } L < x < H \quad T_2(x) = T_l + \varepsilon_2 (P(x) - P_l) + \frac{x}{(H - L)} \left[\varepsilon_2 (P_l - P_y) + (T_y - T_l) \right]. \quad (6)$$

Формулы (4)–(6) не содержат термический эквивалент работы, который трудно определить экспериментально. Они не содержат геотермальный градиент и температуру окружающих пород, которые можно измерить только после длительной выстойки скважин. При расчете нет необходимости вводить поправки [1] на оттаивание многолетнемерзлых пород. Все перечисленные факторы, влияющие на температурный режим скважины, отражены в замерах температуры и давления как минимум в трех точках.

Полученные зависимости, учитывающие особенности теплопереноса в низкотемпературных скважинах предлагается использовать для диагностики причин падения дебита скважин и для принятия мер по предупреждению гидратообразования. Формулы (4) – (6) удобно использовать для **мониторинга термобарического профиля** скважины и во время исследования и во время эксплуатации скважин подобно тому, как проводится мониторинг на газосборных шлейфах.

Литература

1. Брилл Дж.П., Мукерджи Х. Многофазный поток в скважинах. – Ижевск: Институт компьютерных исследований. 2006. – 384с.
2. Аргунова К. К., Бондарев Э.А., Рожин И. И. Математические модели образования гидратов в газовых скважинах // Криосфера Земли, 2011, т. XV, № 2, С. 65–69.

ОБ ОДНОМЕРНОМ СТАЦИОНАРНОМ ДВИЖЕНИИ НЕИЗОТЕРМИЧЕСКОЙ ДВУХФАЗНОЙ СРЕДЫ

Панов А. В.

Челябинский государственный университет
Челябинск, Россия

Рассматривается система уравнений двухфазной газодинамики в одномерном случае. Для данной системы исследуются стационарные движения. Такие движения задаются автономной системой обыкновенных дифференциальных уравнений с трёхмерным фазовым пространством. Полученная динамическая система содержит кривые особых точек различных типов. Данная система исследовалась в книге [1], однако остался ряд открытых вопросов: поведение системы в окрестности кривых, состоящих из особых точек, поведение в окрестности точек пересечения этих особых кривых.

В докладе будет рассказано об исследовании фазового портрета в окрестности особых кривых методами качественного анализа динамических систем [2].

Литература

1. Яненко Н. Н., Солоухин Р. И., Папырин А. Н. и др. Сверхзвуковые двухфазные течения в условиях скоростной неравновесности частиц. Новосибирск: «Наука», 1980 – 160 с.
2. Арнольд В.И., Ильяшенко Ю. С. Обыкновенные дифференциальные уравнения // Итоги науки и техники. Сер. Современ. пробл. мат. Фундам. направления. – 1985. Т. 1. С. 7-140.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВОГО ПРОЦЕССА СВАРКИ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ С УЧЕТОМ ЭВОЛЮЦИИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ СТЕПЕНИ КРИСТАЛЛИЧНОСТИ

Васильева М. А., Старостин Н. П.

Институт проблем нефти и газа СО РАН
Якутск, Россия

Для учета эволюции распределения степени кристалличности полимерного материала при моделировании теплового процесса сварки полимерных труб предлагается данные ДСК при различных скоростях изменения температуры аппроксимировать двумерными кубическими сплайнами. Получены формулы для определения изменения во времени степени кристалличности в каждой точке исследуемого соединения по функции теплового потока ДСК для переменной скорости изменения температуры. Приводятся результаты расчетов теплового режима сварки полиэтиленовых труб.

It is proposed to approximate the DSC data at different rates of temperature change with two-dimensional cubic splines to take into account the evolution of the crystallinity degree

distribution in the polymer material during the modeling the thermal process of welding polymer pipes. Formulas are obtained to determine the time change in the degree of crystallinity at each point of the tested compound by the function of the DSC heat flow for a variable rate of temperature change. Results of calculations of the thermal mode of welding of polyethylene pipes are given.

Введение концентрированной энергии в зону соединения при сварке изделий из полимерных материалов сопровождается сложными физическими и химическими процессами. Приоритетным при этом является тепловая задача, являющаяся ключевым для всех процессов, происходящих при сварке. В связи с этим решению тепловой задачи сварки уделяется особое внимание. На тепловой процесс сварки полимерных материалов существенное влияние оказывает скрытая теплота фазового превращения, которое происходит не по выраженной границе раздела фаз, а в интервале температур. При математическом моделировании тепловых процессов в подобных случаях скрытую теплоту фазовых превращений учитывают, используя уравнения кинетики кристаллизации полимеров. При этом параметры уравнения кинетики идентифицируются по данным дифференциального сканирующего калориметра (ДСК), существенно зависящих от скорости изменения температуры [1]. Поскольку на ДСК скорость изменения температуры постоянная и устанавливается в начале проведения термического анализа материала, параметры уравнения кинетики определяются при дискретных значениях скорости изменения температуры. Таким образом, при использовании уравнения кинетики достаточно трудно учитывать в математической модели непрерывное изменение теплоты фазового превращения от скорости изменения температуры.

Расчетное определение нестационарного температурного поля используется при разработке технологии сварки полиэтиленовых труб при низких температурах [2–3]. В процессе сварки изделий из полимерных материалов скорость изменения температуры неоднородна по всему объему и непостоянна по времени. В данной работе предлагается при численном моделировании теплового процесса сварки полиэтиленовых труб учитывать зависимость теплоты фазового превращения от скорости изменения температуры, непосредственно используя данные ДСК. Аппроксимация данных ДСК при различных скоростях изменения температуры проводилась двумерными кубическими сплайнами. Предложены формулы для определения эволюции во времени степени кристалличности в любой точке сварного соединения. Приводятся результаты расчета динамики температурного поля при сварке полиэтиленовых труб с учетом теплоты фазового превращения по предлагаемой методике.

Работа выполнена в рамках проекта АААА-А21-121011590012-9.

Литература

1. Chebbo Z, Vincent M., Boujlal A., etc. Numerical and Experimental Study of the Electrofusion Welding Process of Polyethylene Pipes // Polymer Engineering And Science. 2015. V. 55, № 1. pp. 123-131.
2. Старостин Н. П., Васильева М. А., Аммосова О.А. Управление нагревом и охлаждением при сварке полиэтиленовых труб в раструб в условиях низких температур // Автоматизация. Современные технологии. – 2019. – Т. 73. № 10. – С. 443-449.
3. Старостин Н. П., Васильева М. А., Ботвин Г.В. Приварка седловых отводов к полиэтиленовым трубам при низких температурах // Сварка и диагностика. 2019. № 1. С. 47-53.

ФИЛЬТРАЦИЯ ВЯЗКОЙ ЖИДКОСТИ В НЕИЗОТЕРМИЧЕСКОЙ ВЯЗКОУПРУГОЙ ПОРИСТОЙ СРЕДЕ

Вирц Р. А., Токарева М. А., Шишмарев К. А.
Алтайский государственный университет
Барнаул, Россия

Дана постановка задачи неизотермической фильтрации жидкости в вязкой пористой среде. В одномерном случае переход к переменным Лагранжа позволяет свести исходную систему определяющих уравнений к уравнениям для давления жидкости, пористости и температуры. Проведено численное исследование полученной системы уравнений.

The formulation of the problem of non-isothermal filtration of a liquid in a viscous porous medium is given. In the one-dimensional case, the transition to Lagrange variables makes it possible to reduce the original system of constitutive equations to equations for fluid pressure, porosity, and temperature. A numerical study of the resulting system of equations is carried out.

В работе исследуется процесс фильтрации жидкости в почвогрунтах, рассматриваемых как пороупругая многофазная среда. Особенностью рассматриваемой модели фильтрации жидкости в пористой среде является учет подвижности твердого скелета и его пороупругих свойств. Для описания процесса используются законы сохранения масс для жидкой и твердой фаз, закон Дарси, реологическое соотношение, закон сохранения баланса сил и уравнение для температуры среды [1]. Вязкость твердой фазы является функцией температуры, так же учитывается зависимость давления жидкости от плотности и температуры. Близкие по структуре системы рассматривались в работах [2–5].

Исходная система определяющих уравнений в одномерном виде сводится к задаче для нахождения пористости, давления жидкости, общего давления среды и температуры. В настоящей работе проводится численное исследование полученной начально-краевой задачи. Результаты расчетов для пористости и скорости твердых частиц среднесуглинистого грунта мягкопластичной и тугопластичной консистенции представлены на рис. 1.

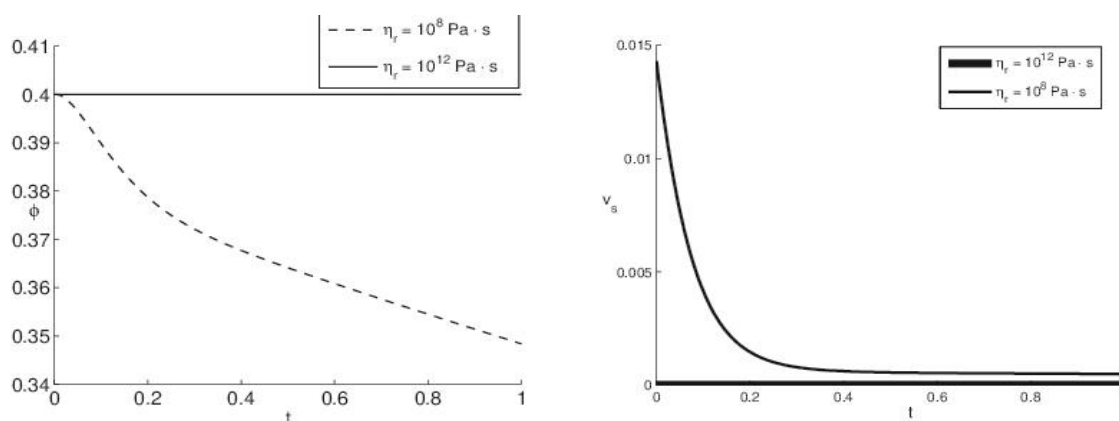


Рис. 1. Распределение пористости среднесуглинистого грунта при $x = 1/2$ (слева) и скорость твердой фазы (справа)

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ по теме "Современные методы гидродинамики для задач природопользования, промышленных систем и полярной механики" (номер темы: FZMW-2020-0008), работа второго и третьего соавторов поддержана грантом

президента МК-204.2020.1 "Начально-краевые задачи для уравнений движения жидкостей в пороупругих средах и их приложения в динамике снежно-ледового покрова", а также при поддержке совместного проекта TUBITAK и РФФИ 20-58-46009 СТ_а "Нагрузки на инженерные сооружения в морском льду".

Литература

1. Бондарев Э. А., Красовицкий Б. А. Температурный режим нефтяных и газовых скважин. – Наука. Сиб. отд-ние, 1974.
2. Papin A. A., Tokareva M. A. On local solvability of the system of the equations of one dimensional motion of magma //Journal of Siberian Federal University. Mathematics & Physics 2017. – 10 (3), Pp. 385 – 395.
3. Tokareva M. A., Papin A. A. Global solvability of a system of equations of one-dimensional motion of a viscous fluid in a deformable viscous porous medium //Journal of Applied and Industrial Mathematics. – 2019. – Vol. 13, No. 2. – Pp. 350-362.
4. Сибин А. Н., Сибин Н. Н. Численное решение одномерной задачи фильтрации с учетом суффозионных процессов //Известия Алтайского государственного университета. – 2017. – №. 1 (93). С. 123 – 126.
5. Вирц Р. А., Папин А. А., Вайгант В. А. Численное решение одномерной задачи фильтрации несжимаемой жидкости в вязкой пористой среде // Известия Алтайского государственного университета. – 2018. – №. 4 (102). С. 62 – 67.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ФИЛЬТРАЦИИ ЖИДКОСТИ В ВЯЗКОУПРУГОЙ ПОРИСТОЙ СРЕДЕ

Вирц Р. А.

Алтайский государственный университет
Барнаул, Россия

Рассматривается математическая модель фильтрации жидкости в пористой среде. Проводится численное исследование полученных начально-краевых задач.

A mathematical model of fluid filtration in a porous medium is considered. A numerical study of the obtained initial – boundary value problems is carried out.

В работе исследуется процесс фильтрации жидкости в вязкоупругой пористой среде. С математической точки зрения рассматриваются уравнения сохранения массы для каждой из фаз (жидкость, твердый скелет), закон Дарси для жидкой фазы, уравнение движения твердого скелета и уравнение для температуры [1]:

$$\frac{\partial \rho_s(1-\varphi)}{\partial t} + \operatorname{div}((1-\varphi)\vec{v}_s \rho_s) = 0, \frac{\partial \varphi \rho_f}{\partial t} + \operatorname{div}(\varphi \vec{v}_f \rho_f) = 0, \quad (1)$$

$$\varphi(\vec{v}_f - \vec{v}_s) = -k(\varphi)(\nabla p_f - \rho_f \vec{g}), \quad (2)$$

$$\operatorname{div} \vec{v}_s = -a_1(\varphi)p_e - a_2(\varphi)\left(\frac{\partial p_e}{\partial t} + \vec{v}_s \cdot p_e\right), \nabla p_{tot} = \rho_{tot} \vec{g}, \quad (3)$$

$$(\rho_f c_f \phi + \rho_s c_s(1-\phi)) \frac{\partial \theta}{\partial t} + ((\rho_f c_f \phi \vec{v}_f + \rho_s c_s(1-\phi)\vec{v}_s) \nabla \theta = \operatorname{div}(K(\phi) \nabla \theta). \quad (4)$$

Здесь $\rho_f, \rho_s, \vec{v}_f, \vec{v}_s$ – соответственно плотности и скорости жидкой и твердой фаз, φ – пористость, $p_e = p_{tot} - p_f$ – эффективное давление, $p_{tot} = \phi p_f + (1-\phi)p_s$ – общее давление, p_f, p_s – соответственно давления жидкой и твердой фаз, $\rho_{tot} = \phi \rho_f + (1-\phi)\rho_s$ – плотность двухфазной среды; $k(\varphi) = k\varphi^n/\mu$ – коэффициент фильтрации, $a_1(\varphi) = \varphi^m/\eta(\theta)$ – коэффициент объемной вязкости, где $\eta(\theta)$ – вязкость твердой фазы; $a_2(\varphi) = \phi^b \beta_\phi$ – коэффициент сжимаемости; θ – температура среды; k – проницаемость твердой среды; μ – динамическая вязкость жидкости; m, n, β_ϕ, b – параметры твердой среды; $K(\phi) = k_f \phi + k_s(1-\phi)$ – усредненный коэффициент теплопроводности среды, где k_f, k_s – теплопроводности жидкой и твердой фаз; c_f, c_s – удельные теплоемкости жидкой и твердой фаз, соответственно. Близкие по структуре системы рассматривались в работах [1–3].

В одномерном неизотермическом случае, когда плотность жидкой фазы постоянна, система определяющих уравнений (1)–(4) сводится к задаче для нахождения функции пористости и температуры. В случае, когда плотность жидкости является функцией давления и температуры, возникает система, состоящая из уравнений для нахождения давления жидкости, пористости, общего давления двухфазной среды и температуры. Разрешимость начально-краевой задачи одномерного нестационарного движения жидкости в теплопроводной вязкой пористой среде доказана в работе [2].

В случае медленных течений твердой фазы, когда конвективным слагаемым можно пренебречь, исходная система в двумерной постановке сводится к уравнениям для нахождения эффективного давления и пористости.

В настоящей работе проводится численное исследование сформулированных начально-краевых задач.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации («Современные методы гидродинамики для задач природопользования, индустриальных систем и полярной механики» тема № FZMW-2020-0008).

Литература

1. Fowler A. Mathematical geoscience. Springer Science & Business Media. – Т. 36. 2011.
2. Papin A.A., Tokareva M.A., Virts R.A. Filtration of liquid in a non-isothermal viscous porous medium //Journal of Siberian Federal University. Mathematics & Physics. – 2020. – No.13 (6). – Pp. 763 – 773.
3. Virts R.A, Papin A.A, Tokareva M.A Non-isothermal filtration of a viscous compressible fluid in a viscoelastic porous medium //Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2020. – Т. 1666, No. 1. – P. 012041.

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МОЩНОГО УЛЬТРАЗВУКА НА СТРОЕНИЕ ВЫСОКОМОЛЕКУЛЯРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ПРИ ПОНИЖЕННЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ

Голых Р. Н.

Бийский технологический институт (филиал) АлтГТУ им. И. И. Ползунова
Бийск, Россия

Выявлен физический механизм изменения свойств высокомолекулярных соединений под действием ультразвуковых колебаний. Предложена численная модель элементарного акта реструктуризации полимерных цепей под действием механических колебательных возмущений. Выполнено масштабирование численной модели на ансамбль множества молекул. В результате проведенного масштабирования сформулировано кинетическое уравнение эволюции фракционного состава макромолекул с различными количествами мономерных звеньев.

The physical mechanism of changes in the properties of high-molecular compounds under the ultrasonic vibrations has been revealed. A numerical model is proposed for the elementary act of restructuring of polymer chains under the mechanical vibration disturbances. The numerical model is scaled to an ensemble of many molecules. As a result of this scaling, the kinetic equation for the fractional composition of macromolecules with different amounts of monomer units has been formulated.

Принципиальная возможность модификации свойств высокомолекулярных соединений (смола и нефти), находящихся в жидком агрегатном состоянии, воздействием мощного ультразвука экспериментально доказана более 40 лет назад и изучается по сегодняшний день. Ультразвук позволяет снижать вязкость, увеличивать пространственную однородность молекулярного и дисперсного состава. Установленный

на сегодняшний день главный эффект от действия ультразвука – это снижение вязкости за счёт механической деструкции полимерных цепей без многократного повышения температуры среды.

Проблема снижения вязкости является актуальной не только в химии и технологии полимеров. Актуальность проблемы возрастает в нефтехимии в связи с увеличением доли трудноизвлекаемых запасов нефти, имеющих повышенную вязкость, от общего объёма, разведанного на сегодняшний день. В основном, трудноизвлекаемые запасы нефти имеются в месторождениях севернее 60° с.ш., т. е. находятся при пониженных температурах.

Возможность снижения вязкости нефти ультразвуком исследовалась в отечественных работах (например, Институт общей и неорганической химии им. Н. С. Курнакова РАН, г. Москва; Институт химии нефти СО РАН, г. Томск) (рис. 1) [1].

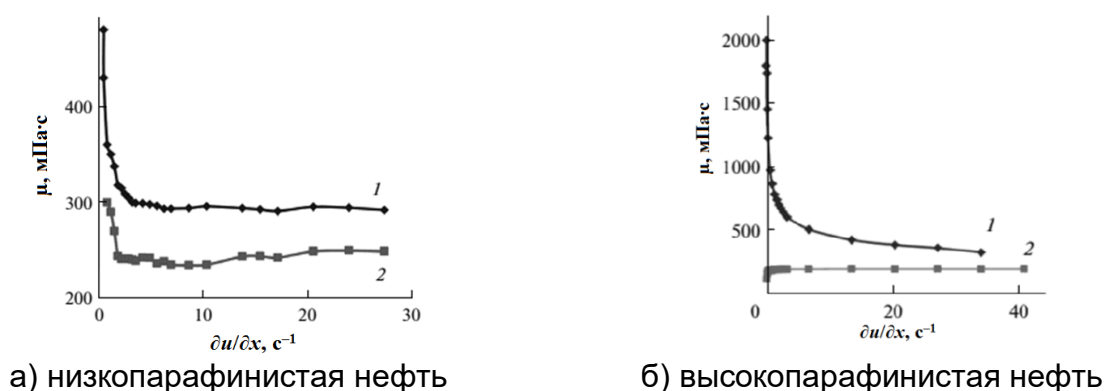


Рис. 1. Зависимости вязкости нефти от скорости сдвига до (1) и после (2) ультразвуковой обработки

Установлено, что в результате ультразвукового воздействия наблюдается пониженная вязкость во всём практически доступном диапазоне скоростей сдвига.

Однако все исследования влияния ультразвука на реологические свойства смол и нефтей проводились, в основном, экспериментальными методами. Попыток моделирования данного влияния до сегодняшнего дня практически не предпринималось (имелись отдельные попытки создания моделей движения и деформации полимерных цепей без рассмотрения периодических колебательных возмущений давления).

В свою очередь, моделирование позволяет предсказать изменение структуры полимерных цепей под действием ультразвука, структуру и свойства среды при различных принципах формирования колебаний (включая амплитудную модуляцию первичного звукового давления, комбинацию ультразвука с низкочастотным воздействием) без необходимости проведения трудоёмких и многократных экспериментов.

Автором на основе априорных оценок выявлен физический механизм изменения свойств высокомолекулярных соединений под действием ультразвуковых колебаний. Выявленный физический механизм подтверждён данными ИК-спектроскопии, полученными в БТИ АлтГТУ совместно с АО «ФНПЦ «Алтай» [2].

Предложена численная модель элементарного акта реструктуризации полимерных цепей под действием механических колебательных возмущений (предполагалось, что звенья полимерной цепи воздействуют с потенциалом Морзе $U(r) = D_{\sigma} (1 - e^{-\alpha(r-r_e)})^2$).

Выполнено масштабирование численной модели на ансамбль множества молекул. В результате проведённого масштабирования сформулировано кинетическое уравнение эволюции фракционного состава макромолекул с различными количествами мономерных звеньев.

$$\begin{aligned} \frac{dn_i}{dt} = & \sum_{k=1}^{\infty} \sum_{j=1, j \neq k}^{\infty} n_k n_j \sum_{\{k_1, k_2, \dots, k_m\} | k_1 + k_2 + \dots + k_m = k} \sum_{\{j_1, j_2, \dots, j_n\} | j_1 + j_2 + \dots + j_n = j} \left(\sum_{p=1}^m I(k_p = i) \right) \beta_{k, j \rightarrow \{k_1, k_2, \dots, k_m\}, \{j_1, j_2, \dots, j_n\}} + \\ & + \sum_{k=1}^{\infty} n_k^2 \sum_{\{k_1, k_2, \dots, k_m\} | k_1 + k_2 + \dots + k_m = 2k; \exists p_1 < p_2 < \dots < p_l \left| \sum_{s=1}^l k_{p_s} = k} \left(\sum_{p=1}^m I(k_p = i) \right) \beta_{k, k \rightarrow \{k_1, k_2, \dots, k_m\}} - \\ & - \sum_{j=1, j \neq i}^{\infty} \sum_{\{i_1, i_2, \dots, i_m\} | i_1 + i_2 + \dots + i_m = i} \sum_{\{j_1, j_2, \dots, j_n\} | j_1 + j_2 + \dots + j_n = j} \beta_{i, j \rightarrow \{i_1, i_2, \dots, i_m\}, \{j_1, j_2, \dots, j_n\}} n_i n_j - \\ & - 2 \sum_{\{i_1, i_2, \dots, i_m\} | i_1 + i_2 + \dots + i_m = 2i; \exists p_1 < p_2 < \dots < p_l \left| \sum_{s=1}^l i_{p_s} = i} \beta_{i, i \rightarrow \{i_1, i_2, \dots, i_m\}} n_i^2 \end{aligned}$$

где $\beta_{k, j \rightarrow \{k_1, k_2, \dots, k_m\}, \{j_1, j_2, \dots, j_n\}}$ – вероятность одновременного соударения и разрушения макромолекул с весами k, j ($k \neq j$) на фрагменты, имеющие веса из множества $\{k_1, k_2, \dots, k_m\}$ (фрагменты молекулы с весом k) и из множества $\{j_1, j_2, \dots, j_n\}$ (фрагменты молекулы с весом j), при единичных концентрациях молекул с весами k, j в единицу времени, $\text{м}^3/(\text{моль} \cdot \text{с})$; $\beta_{k, k \rightarrow \{k_1, k_2, \dots, k_m\}}$ – вероятность образования фрагментов с весами из множества $\{k_1, k_2, \dots, k_m\}$ при соударении и разрушении пары макромолекул с одинаковыми весами k, k при единичной концентрации молекул с весом k в единицу времени, $\text{м}^3/(\text{моль} \cdot \text{с})$; n_k – молярная концентрация макромолекул с весом k , $\text{моль}/\text{м}^3$; t – время, с; $I(k_p = i)$ – функция-индикатор, равная 1, если $k_p = i$, и 0, если $k_p \neq i$.

Выявлено существование оптимальной интенсивности, обеспечивающей максимальный КПД воздействия ультразвука (КПД определялся как отношение энергии разрушенных химических связей к суммарной введенной энергии ультразвука), которое подтверждено экспериментальными данными.

Исследование выполнено при поддержке Гранта Президента РФ № МК-5387.2021.1.1.

Литература

1. Mullakaev M.S., Volkova G.I., Gradov O.M. Effect of ultrasound on the viscosity-temperature properties of crude oils of various compositions // Theoretical Foundations of Chemical Engineering. – 2015. – Vol. 49, No. 3. – Pp. 287–296.
2. Минаков В.Д., Лопатин Р. А., Попок Н. И., Попок В.Н., Голых Р.Н., Хмелёв В.Н., Шалунов А. В. Влияние режимов ультразвукового кавитационного воздействия на процесс деполимеризации // Технологии и оборудование химической, биотехнологической и пищевой промышленности: материалы XII Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых с международным участием. – 2019. – С. 238–241.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВНЕШНЕЙ И ВНУТРЕННЕЙ ПРИСОЕДИНЕННОЙ МАССЫ ТРУБОПРОВОДА

Юлмухаметов А. А., Шакирьянов М. М.
Институт механики им. Р.Р. Мавлютова УФИЦ РАН
Уфа, Россия

Рассмотрены сопротивления сплошных сред при ускоренном движении трубопровода. Труба бесконечной длины, окруженный жидкостью, движется с ускорением перпендикулярно своей оси. Транспортируемая газожидкостная среда в трубе имеет кольцевую структурную форму течения. Возмущенные движения внутренних сред

описываются уравнениями Лапласа в полярных координатах относительно потенциалов скоростей. Числовые расчеты выполнены при конкретных значениях входных параметров.

Considered are the resistances of continuous media during the accelerated movement of the pipeline. A pipe of infinite length surrounded by liquid moves with acceleration perpendicular to its axis. The transported gas-liquid medium in the pipe has an annular structural flow. The disturbed motions of internal media are described by the Laplace equations in polar coordinates with respect to the velocity potentials. Numerical calculations were performed for specific values of the input parameters.

Роль трубопроводных систем в хозяйстве нашей страны трудно переоценить: они широко применяются в нефтегазовой и химической промышленности, атомной энергетике, авиационной и ракетно-космической технике и многих других машинах и аппаратах. Транспортировка нефти, газового конденсата, продуктов нефтепереработки или газа по трубопроводам осуществляется работой насосных станций, которые при этом создают внутреннее переменное или ударное давление. В результате взаимодействия этого давления и изменений кривизны осевой линии трубопровод может совершать изгибные колебательные движения, которые происходят с ускорением. При определенных соотношениях между входными параметрами максимальное значение ускорения, например, средней точки пролета трубы может достигать нескольких десятков величин ускорения гравитации. Ускоренные поперечные движения трубы могут быть обусловлены также другими механическими воздействиями. В общем случае ускоренного движения трубопровод испытывает силы сопротивления со стороны внешней сплошной и внутренней газожидкостной сред. При этом указанные силы принято учитывать путем прибавления к массе трубопровода внешней и внутренней присоединенных масс сред [1–3]. Величины присоединенных масс определяются решениями краевых задач взаимодействия трубы с возмущенными ее ускоренным движением средами.

В исследуемой работе рассматривается ускоренное поступательное движение бесконечно длинного недеформируемого трубопровода с заключенной в нем несжимаемой газожидкостной средой. Транспортируемая среда в трубопроводе состоит из несжимаемых газовой и жидкой фаз с известными плотностями. Круговая труба окружена несжимаемой жидкостью с известной плотностью. Предполагается, что течение газа в осевом направлении происходит внутри жидкой круговой цилиндрической области. Изменениями формы и толщины цилиндрического слоя из-за веса газожидкостной среды пренебрегается. Это может быть приемлемо, когда труба располагается вертикально или в условиях невесомости и малой гравитации. При равномерном движении трубопровода суммарная сила сопротивления внешней и внутренней сред равна нулю. С ускорением движения трубопровода давления на его внешней и внутренней поверхностях изменяются. Вследствие этого возникает сопротивление движению трубы, обуславливающее эффект присоединенной массы.

Возмущенные движения внутренних газовой, жидкой и внешней сплошной сред, вызванные ускорением трубопровода, описываются уравнениями Лапласа [3]. Граничные условия формулируются на внутренней и внешней цилиндрических поверхностях трубы и на контактной поверхности между газовой и жидкой средами. В результате решения задачи получены формулы, определяющие возмущения давления в областях с жидкой фазой газожидкостной и обтекающей трубу сплошной средах.

Числовые расчеты были проведены для конкретных значений входных параметров. Из результатов вычислений можно отметить следующие выводы:

Отношение присоединенных масс жидкости с учетом и без учета перетекания частиц газожидкостной среды в поперечных сечениях является функцией плотностей сред и геометрических размеров трубы.

С увеличением плотности газовой фазы внутренней среды функция отношения присоединенных масс увеличивается. При равенстве плотностей газовой и жидкой фаз суммарная присоединенная масса не изменяется.

Увеличение плотности жидкой фазы внутренней среды приводит к большему уменьшению функции отношения присоединенных масс. При этом минимумы функции сдвигаются в сторону уменьшения толщины жидкого слоя.

При пренебрежимо малых значениях отношения плотностей внешней и внутренней жидкой сред приближенно можно считать, что эффективная присоединенная масса полностью определяется перетеканием частиц транспортируемого продукта в поперечных сечениях трубопровода.

Литература

1. Ильгамов М. А. Колебания упругих оболочек, содержащих жидкость и газ. М.: Наука, 1969. 180 с.
2. Седов Л.И. Механика сплошной среды. Т. 2. М.: Наука, 1970. 568 с.
3. Ильгамов М. А. Введение в нелинейную гидроупругость. М.: Наука, 1991. 200 с.

О НЕМГНОВЕННЫХ ИМПУЛЬСНЫХ УРАВНЕНИЯХ АДВЕКЦИИ-ДИФФУЗИИ-РЕАКЦИИ В ГЛЯЦИОЛОГИИ

Кузнецов И. В., Саженов С. А.

Институт гидродинамики им. Лаврентьева СО РАН

Новосибирск, Россия

Алтайский государственный университет

Барнаул, Россия

В докладе рассматриваются немгновенные импульсные уравнения адвекции-диффузии-реакции (1) для моделирования теплопередачи в ледяных покровах [2]. Под реакцией понимается взрывная неустойчивость, вызываемая давлением и называемая в литературе эффектом Бриджмена [3, 4]. Вместо генерации и распространения ударных волн во льду [5], на данном этапе нашего исследования мы имеем дело со слабыми решениями уравнений адвекции-диффузии-реакции. Основной целью исследования является применение результатов, полученных для уравнений диффузии-реакции [1]. In the present report, we treat non-instantaneous impulsive advection-diffusion-reaction equations to simulate heat transfer in ice sheets [2]. Here, the reaction term attributes for pressure-induced explosive instability phenomenon – the Bridgman effect [3, 4]. Instead of shock-waves generating and penetrating in ice [5], at the present stage of our research, we deal with weak solutions of advection-diffusion-reaction equations. The main aim of research is to apply results obtained for diffusion-reaction equations [1] to the former ones.

Более точно, рассматривается задача

$$\begin{cases} \partial_t u_\varepsilon + \operatorname{div}_x \mathbf{f}(u_\varepsilon) = \Delta_x u_\varepsilon + K_\varepsilon^\tau(t) \beta(\mathbf{x}, u_\varepsilon), & (\mathbf{x}, t) \in \Omega \times (0, T), \\ u_\varepsilon(\mathbf{x}, 0) = u_0(\mathbf{x}) \text{ в } \Omega, \quad u_\varepsilon|_{\Gamma_l} = 0, \end{cases} \quad (1)$$

где $\Gamma_l = \partial\Omega \times (0, T)$, $\Omega \subset \mathbb{R}^d$, $\beta(\mathbf{x}, \lambda)$ – гладкая функция, $K_\varepsilon^\tau(t)$ – аппроксимация односторонней дельта-функции Дирака $\delta_{(t=\tau-0)}$, $0 < \tau < T$, $\mathbf{f}(\lambda) = (f_1(\lambda), \dots, f_d(\lambda))$ – гладкая вектор-функция. Под немгновенными импульсными уравнениями мы понимаем наличие неограниченной правой части, действующей на бесконечно малом временном промежутке. Проводится обоснование предельного перехода $u_\varepsilon \rightarrow u$ от немгновенных дифференциальных уравнений к мгновенным, т. е., когда длительность процесса

(взрывная неустойчивость), связанного с действием сингулярного источника, стремится к нулю. В частности, выводится предельное импульсное условие в виде ОДУ по переменной ϑ :

$$\partial_{\vartheta} \bar{u}(\mathbf{x}, \vartheta) = K(\vartheta) \beta(\mathbf{x}, \bar{u}(\mathbf{x}, \vartheta)), \quad (\mathbf{x}, \vartheta) \in \Omega \times (0, 1), \quad \bar{u}(\mathbf{x}, 0) = u(\mathbf{x}, \tau - 0), \quad \bar{u}(\mathbf{x}, 1) = u(\mathbf{x}, \tau + 0), \quad (2)$$

которое отличается от стандартного импульсного условия

$$u(\mathbf{x}, \tau + 0) = u(\mathbf{x}, \tau - 0) + \beta(\mathbf{x}, u(\mathbf{x}, \tau - 0)). \quad (3)$$

Импульсное условие (2) следует из уравнения типа Аллена-Кана:

$$\partial_{\vartheta} \bar{u}_{\varepsilon} + \varepsilon \operatorname{div}_{\mathbf{x}} \mathbf{f}(\bar{u}_{\varepsilon}) = \varepsilon \Delta_{\mathbf{x}} \bar{u}_{\varepsilon} + \varepsilon K_{\varepsilon}^{\tau}(\tau + (\vartheta - 1)\varepsilon) \beta(\mathbf{x}, \bar{u}_{\varepsilon}), \quad (\mathbf{x}, \vartheta) \in \Omega \times (0, 1),$$

вместе со следующими условиями

$$\varepsilon K_{\varepsilon}^{\tau}(\tau + (\vartheta - 1)\varepsilon) \xrightarrow{\varepsilon \rightarrow 0+} K(\vartheta), \quad \int_0^1 K(\vartheta) d\vartheta = 1, \quad \bar{u}_{\varepsilon}(\mathbf{x}, \vartheta) \xrightarrow{\varepsilon \rightarrow 0+} \bar{u}(\mathbf{x}, \vartheta).$$

В свою очередь, импульсное условие (3) следует из мгновенного импульсного уравнения адвекции-диффузии

$$\partial_t u + \operatorname{div}_{\mathbf{x}} \mathbf{f}(u) = \Delta_{\mathbf{x}} u + \delta_{(t=\tau-0)} \beta(\mathbf{x}, u).$$

Подчеркнем, что основной повесткой доклада будет обсуждение различия между импульсными условиями (2) и (3), которые поражаются односторонней дельта-функцией Дирака $\delta_{(t=\tau-0)}$ и, соответственно, её сглаживанием $K_{\varepsilon}^{\tau}(t)$.

Работа выполнена в рамках гос. задания Министерства науки и высшего образования РФ по теме «Современные методы гидродинамики для задач природопользования, промышленных систем и полярной механики» (номер темы: FZMW-2020-0008).

Литература

1. Antontsev S.N., Kuznetsov I.V., Sazhenkov S.A. A shock layer arising as the source term collapses in the $p(x)$ -Laplacian equation // Issues Anal. – 2020. – Vol. 9(27). – Pp. 31–53.
2. Патерсон У.С.Б., Физика ледников. 2-е изд., пер. с англ., М.: Мир, 1984. – 472 с.
3. Фатеев Е.Г. Взрывоподобная неустойчивость льда // Письма в ЖЭТФ. – 2001. – Т. 73. – Стр. 482–485.
4. Фатеев Е.Г. Взрывная неустойчивость аммоний-водного льда // Письма в ЖЭТФ. – 2008. – Т. 88. – Стр. 276–280.
5. Stewart S.T., Ahrens T.J. Shock properties of H₂O ice // JGR: Planets. – 2005. – Vol. 73. – Pp. 432–435.

КВАТЕРНИОННЫЙ АНАЛИЗ КАК МЕТОД МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ТРЕХМЕРНЫХ ЗАДАЧ

Григорьев Ю. М., Яковлев А. М.
СВФУ им. М. К. Аммосова, Академия наук РС (Я)
Якутск, Россия

Комплексный анализ является эффективным математическим аппаратом для решения двумерных задач математической физики, механики сплошных сред и др. Для трехмерных задач аналогичным инструментом является гиперкомплексный анализ, т. е. моногенные Клиффордовы или регулярные кватернионные функции. В работе представлен обзор исследований по кватернионному анализу и его приложениям, проводимых в Якутске.

Complex analysis is an effective mathematical tool for solving two-dimensional problems of mathematical physics, mechanics of continua etc. For three-dimensional problems, a similar tool is hypercomplex analysis, i.e. monogenic Clifford or regular quaternionic functions. The report provides an overview of research on quaternion analysis and its applications carried out in Yakutsk.

В двумерных задачах математической и теоретической физики, механики сплошных сред используются методы теории комплексных функций. В качестве обобщения для многомерных задачах с 1930-х годов развиваются методы гиперкомплексных функций на основе работ Г. К. Моисила и Н. Теодореску (1931), Р. Фуетера (1932). В настоящее время разработаны различные варианты таких теорий (см. [1, 2] и др.). В этом сообщении представляются работы, выполненные в СВФУ им. М. К. Аммосова (ЯГУ) в этом направлении. Основой теорий гиперкомплексных функций являются многомерные обобщения системы Коши-Римана. Такие системы возникают, если определить регулярные (моногогенные, гиперголоморфные и т. д.) гиперкомплексные функции как ядро обобщенных оператора Коши-Римана или Дирака с использованием некоторой многомерной гиперкомплексной алгебры. В трехмерном случае имеется система Моисила-Теодореску (СМТ), она изучалась с точки зрения дифференциальных уравнений с частными производными многими математиками (А. В. Бицадзе, В. И. Шевченко и др.). В наших исследованиях теория СМТ развивается как теория регулярных кватернионных функций неполной кватернионной переменной [3, 4]. Для общего многомерного случая наиболее развит клиффордов анализ [1, 2] с приложениями в математической физике. Клиффордов анализ как частный случай включает теорию СМТ, но трехмерный случай особо важен для приложений и, поэтому, имеется необходимость отдельного развития теории СМТ. Отметим, что наша теория лишь частично охватывается клиффордовым анализом, поскольку мы используем другую систему регулярных полиномов.

Нами введены [3, 4] лево-регулярные кватернионные полиномы для СМТ и показано, что теория регулярных кватернионных функций неполной кватернионной переменной может быть развита с использованием этих полиномов. Свойства введенных полиномов подробно представлены в [15]. В [4, 5] доказаны три аналога аппроксимационных теорем комплексного анализа о полиномиальных приближениях кватернионных функций на компактных множествах. В [12] представлен метод кватернионных граничных элементов, основанный на интегральной формуле Коши и с примером численной реализации. В целом следует отметить, что кватернионный анализ довольно полно разработан как трехмерный аналог комплексного анализа. В устном сообщении более подробно будут приведены результаты по приложению развитой теории в трехмерных задачах механики сплошной среды, опубликованные в ряде работ с 1980-х годов по наше время [6-23]. Отметим только то, что основой приложений кватернионных функций в теории упругости является кватернионный аналог формул Колосова-Мусхелишвили, который представляет собой общее решение уравнения Ламе теории упругости, выраженное через две произвольные регулярные кватернионные функции. Различные варианты этой формулы и их приложения опубликованы в [6-10, 13-16, 18].

Литература

1. F. Brackx, R. Delanghe, and F. Sommen. Clifford Analysis. Research Notes in Mathematics No. 76, Pitman, London, 1982.
2. K. Gurlbeek, K. Habetha and W. Sprossig. Holomorphic functions in the plane and n-dimensional space. Birkhauser Verlag, Basel-Boston-Berlin, 2008.
3. Наумов В. В., Григорьев Ю.М. Ряд Лорана для системы Моисила-Теодореску // Динамика сплошной среды. Вып. 54. 1982. С. 115-126.
4. Григорьев Ю.М., Наумов В. В. Аппроксимационные теоремы для системы Моисила-Теодореску // Сиб. матем. журнал. 1984. Т. 25. №5. С. 9-19.
5. Yu. M. Grigor'ev and V. V. Naumov. Approximation theorems for the Moisil-Theodorescu system // Siberian Mathematical Journal, September-October, 25, Issue 5 (1984), 693-701, doi:10.1007/BF00968681
6. Григорьев Ю.М. Некоторые решения пространственных статических уравнений Ламе // Динамика сплошной среды. 1984. Вып. 67. С. 29-36.
7. Григорьев Ю.М. Решение одной задачи для упругого шара в замкнутой форме // Динамика сплошной среды. 1985. Вып. 71. С. 50-54.
8. Аннин Б.Д., Григорьев Ю.М., Наумов Ю.М. Решение пространственных статических задач теории упругости методами теории кватернионных функций / Численные методы решения задач теории упругости и пластичности: Материалы IX Всесоюз. конференции, Саратов, 26-30 июня 1985 г. Новосибирск, 1986. С. 35-42.

9. Наумов В. В. Решение двух основных задач о равновесии упругого шара в замкнутой форме // Динамика сплошной среды. 1987. Вып. 78. С. 96 – 108.
10. Григорьев Ю.М., Наумов В. В. Решение третьей и четвертой основных задач о равновесии упругого шара в замкнутой форме // Динамика сплошной среды. 1988. Вып. 87. С. 54 – 66.
11. Григорьев Ю.М. Пространственный аналог интегрального уравнения Мусхелишвили // Динамика сплошной среды. 1999. Вып. 114. С. 161-165.
12. Григорьев Ю.М., Алехин В. В. Кватернионный метод граничных элементов // Сибирский журнал индустриальной математики. 1999. Т. 2., № 1. С. 47-52.
13. Yu. Grigor'ev. Three-dimensional Quaternionic Analogue of the Kolosov–Muskhelishvili Formulae / Hypercomplex Analysis: New perspectives and applications, Trends in Mathematics (Eds. S. Bernstein, U. Kaehler, I. Sabadini, F. Sommen), Birkhauser, Basel (2014), 145-166, doi 10.1007/978-3-319-08771-9-10
14. Yu. Grigor'ev. Radial integration method in quaternion function theory and its applications // AIP Conference Proceedings, 1648, 440003 (2015), doi 10.1063/1.912654.
15. Yu. Grigor'ev. Three-dimensional Analogue of Kolosov-Muskhelishvili Formulae / In: Bernstein S., Kahler U., Sabadini I., Sommen F. (eds) Modern Trends in Hypercomplex Analysis. Trends in Mathematics. Birkhauser, Cham(2016), 203-215, doi 10.1007/978-3-319-42529-0_11
16. Y.M. Grigor'ev. Regular quaternionic polynomials and their properties // Complex Variables and Elliptic Equations, **62**, No 9, 1343-1363 (2017), doi 10.1080/17476933.2016.1250877.
17. Yu. Grigor'ev. Quaternionic Functions and Their Applications in a Viscous Fluid Flow // Complex Analysis and Operator Theory, No 12, 491–508, (2018), doi 10.1007/s11785-017-0715-z
18. Yu. Grigor'ev, K. Gurlbeck and D. Legatiuk. Quaternionic formulation of a Cauchy problem for the Lamé equation // AIP Conference Proceedings, **1978** 280007 (2018), doi 10.1063/1.5043907.
19. Yu. Grigor'ev, K. Gurlbeck, D. Legatiuk and A. Yakovlev. On Quaternionic Functions for the Solution of an Ill-posed Cauchy Problem for a Viscous Fluid // AIP Conference Proceedings, (2018), to be published.
20. Yuri M. Grigor'ev. Quaternionic functions and their applications in mechanics of continua // AIP Conference Proceedings 2041, 050017 (2018); doi: 10.1063/1.5079386
21. Grigor'ev, K. Gurlbeck, D. Legatiuk, and A. Yakovlev. On quaternionic functions for the solution of an ill-posed Cauchy problem for a viscous fluid // AIP Conference Proceedings 2116, 160005 (2019); doi 10.1063/1.5114149

ИЗОТЕРМИЧЕСКИЕ ТЕЧЕНИЯ ПУЗЫРЬКОВОЙ СМЕСИ В КАВИТАЦИОННОМ АЭРАТОРЕ

Кулагина Л. В.

Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

Изложена модель анализа гидродинамических характеристик суперкавитационных аппаратов (СК-аппаратов) различного типа, а также в других прикладных задачах механики многофазных сред, существующих в кавитационных технологиях. Отмечено, что гидродинамические задачи для парогазового пузырька в жидкости играют определяющую роль в широких технических приложениях, как-то: течения в кавитационных реакторах и эмульгаторах, аэрация скоростных потоков высоконапорных гидротехнических сооружений, аэрация акватории рек, воды в естественных и искусственных водоемах, барботажные системы различных технологических процессов и многое другое.

A mathematical model for analyzing the hydrodynamic characteristics of supercavitation vehicles (SC-vehicles) of various types, as well as in other applied problems of the mechanics of multiphase media, existing in cavitation technologies, is presented. It is noted that hydrodynamic problems for a vapor-gas bubble in a liquid play a decisive role in broad technical applications, such as: flows in cavitation reactors and emulsifiers, aeration of high-speed flows of high-pressure hydraulic structures, aeration of river water areas, water in natural and artificial reservoirs, bubbling systems of various technological processes and much more.

Перемешивание газов в жидких средах широко применяется в химической промышленности для приготовления эмульсий, суспензий и получения гомогенных систем (растворов), а также для интенсификации химических, тепловых и диффузионных процессов в теплоэнергетике, машиностроении, медицине и других отраслях производства [1–4]. Перемешивание используется также для воздушнонасыщения (аэрирования) потоков и водоемов (например, с целью защиты гидротехнических сооружений от кавитационной эрозии; кислородонасыщения поливной воды или воды в водоемах для разведения рыб и т. п.) и др. Одним из основных способов перемешивания

в жидких средах является механический (с помощью мешалок различных типов). Перспективным механизмом создания пузырьковых газожидкостных смесей представляется механизм, основанный на эффектах гидродинамической кавитации. Теория кавитационных аэраторов (смесителей) развита недостаточно и, как следствие, возникает необходимость детальной разработки этой проблемы.

Образующаяся в аэраторах пузырьковая газожидкостная смесь обладает специфическими особенностями, как-то: повышенная сжимаемость, что, в частности, приводит к резкому снижению значения скорости звука в смеси; изменение структуры течения, что в режиме «ламинарного» течения приводит к значительному возрастанию гидравлических потерь; возможность коагуляции или дробления пузырьков, т. е. изменение форм течения, вплоть до пленочных, «пробковых» или «снарядных» режимов (с газовой фазой внутри или снаружи жидкости). Поэтому течение в подобных аппаратах необходимо рассматривать в рамках механики многофазных сред с введением соответствующих теоретических моделей и методов математического описания, а также численных методов расчета подобных течений [5–8].

Следует отметить, что гидродинамические задачи для парогазового пузырька в окружающей его жидкости играют определяющую роль в понимании механизма кавитации [1, 2], гидроакустики [4], тепловых физики [2, 3] и в других разделах современной науки. Они связаны также с широкими техническими приложениями, как-то: работа пузырьковых камер, используемых в ядерных исследованиях, по физике высоких энергий; газо-жидкостные гидрореактивные двигатели и стартовые пуски ракет из под воды; подводные взрывы (в том числе и атомные); барбатажные системы различных технологических процессов; кавитационный шум и эрозия корабельных движителей и быстроходных гидромашин и аппаратов; кавитационные реакторы и эмульгаторы; аэрация скоростных потоков высоконапорных гидротехнических сооружений; аэрация акватории рек, воды в естественных и искусственных водоемах и многое другое.

Как показывают численные оценки, смесь «газ-жидкость» практически можно считать изотермической. Так, для одномиллиметрового пузырька, нагретого до 1000 °С, его полное остывание происходит в течение 0,5 сек. [9]. При больших концентрациях $\alpha^{(i)}$ и скоростях течения $\vec{V}^{(i)}$ относительно небольшим скольжением фаз $\vec{U}^{(ij)}$ можно пренебречь. Таким образом многофазный континуум «газ-жидкость» для пузырьковых режимов течений можно рассматривать в рамках изотермической модели, развитой в 1965 г. Б.С. Когарко под руководством Л.И. Седова [10], т. е. в рамках односкоростного течения жидкости, но с учетом динамики радиального движения границ пузырька (инерции внешней жидкости).

Полная система уравнений для такой односкоростной модели пузырьковой газожидкостной смеси в случае пространственного течения запишется (индекс «1» – для жидкой и индекс «2» – для газовой составляющей смеси) следующим образом:

1. Уравнение неразрывности –

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + (\vec{V} \cdot \vec{\nabla})\rho + \rho \operatorname{div} \vec{V} = 0; \quad (1)$$

2. Уравнение для плотности –

$$\rho = (1 - \alpha^{(2)})\rho^{(1)} + \alpha^{(2)}\rho^{(2)}; \quad (2)$$

3. Уравнение движения –

$$\rho \left[\frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + (\vec{V} \cdot \vec{\nabla})\vec{V} \right] = -\vec{\nabla}p + \frac{1}{3} \operatorname{grad} \operatorname{div} \vec{V} + \mu \Delta \vec{V} \quad \text{при } \mu = \text{const}, \quad (3)$$

где $p = (1 - \alpha^{(2)})p^{(1)} + \alpha^{(2)}p^{(2)}$;

4. Уравнение для объемной концентрации пузырьковой смеси –

$$\alpha^{(2)} = \alpha_0^{(2)} \cdot \left(\frac{R}{R_0} \right)^3; \quad (4)$$

5. Динамическое уравнение состояния границы пузырька (типа Релея) –

$$\rho^{(1)} \left[R \ddot{R} + \frac{3}{2} \dot{R}^2 \right] = p^{(2)} - p^{(1)} - 4\mu^{(1)} \frac{\dot{R}}{R} - \frac{2\sigma^{(1)}}{R}; \quad (5)$$

6. Уравнение изотермического расширения газа (с учетом постоянства массы в пузырьке) –

$$\frac{p^{(2)}}{p_0^{(2)}} = \frac{\rho^{(2)}}{\rho_0^{(2)}} = \left(\frac{R_0}{R} \right)^3; \quad (6)$$

7. Уравнение совместного деформирования (связь давления в пузырьке и в жидкости на границе) –

$$p^2 = p_{ep}^{(1)} + \frac{2\sigma^{(1)}}{R} + 4\mu^{(1)} \frac{\dot{R}}{R}. \quad (7)$$

Полученная модель может применяться при анализе гидродинамических характеристик аппаратов различного типа, а также в других прикладных задачах механики многофазных сред.

Литература

1. Ивченко В.М., Кулагин В. А., Немчин А.Ф. Кавитационная технология. Красноярск: Изд-во КГУ, 1990. – 200 с. ISBN 5-7470-0088-8.
2. Демиденко Н.Д., Кулагин В. А., Шокин Ю.И., Ли Ф.-Ч. Тепломассообмен и суперкавитация. Новосибирск: Наука, 2015. – 436 с. ISBN 978-5-02-019206-5.
3. Гутенев В. В., Кулагина Т.А., Кулагина Л.В. и др. Экология техносферы. М.: Изд-во «Маджента», 2008. – 468 с. ISBN 5-98156-084-3.
4. Kulagin V.A., Kulagina L.V., Li Feng-Chen. Fundamentals of Cavitation Treatment for Multicomponent Environments. M.: RU-SCIENCE, 2017. – 182 p. ISBN 978-5-4365-1862-6.
5. Демиденко Н.Д., Кулагина Л.В. Моделирование и оптимизация технических систем с распределенными параметрами. Красноярск: ИПЦ КГТУ, 2006. 210 с. ISBN 5-7636-0411-3.
6. Zhi-Ying Zheng, Qian Li, Lu Wang, Li-Ming Yao, Wei-Hua Cai, Vladimir A. Kulagin, Hui Li, Feng-Chen Li Numerical study on the effect of steam extraction on hydrodynamic characteristics of rotational supercavitating evaporator // Desalination 455 (2019) 1–18; doi.org/10.1016/j.desal.2018.12.012.
7. Кулагин В. А., Пьяных Т.А. Исследование кавитационных течений средствами математического моделирования // Журнал сиб. федер. ун-та. Техника и технологии. 2012, 5(1). С. 57–62.
8. Yu-Ke Li, Zhi-Ying Zheng a, Hong-Na Zhang, Feng-Chen Li a, Shizhi Qian, Sang Woo Joo, Ludmila V. Kulagina Numerical study on secondary flows of viscoelastic fluids in straight ducts: Origin analysis and parametric effects. Computers and Fluids 152 (2017) 57–73; http://dx.doi.org/10.1016/j.compfluid.2017.04.016.
9. Ивченко В.М., Приходько Н.А., Сирый В.С. Численное решение задачи охлаждения пузырька горячего газа в жидкости // Гидромеханика. Киев: Наукова думка, 1971. Вып. 19, С. 19–24.
10. Когарко Б.С. Об одной модели кавитирующей жидкости // ДАН СССР, 1961. Т. 137. № 6. С. 1331–1333.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОДЕРЖАНИЯ РАДИОАКТИВНЫХ АЭРОЗОЛЕЙ В ВОЗДУХЕ

Кулагина Т. А., Иванов С. А.

Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

В статье приводится усовершенствованная методика измерения содержания радиоактивных аэрозолей в воздухе помещений, в части сокращения времени определения требуемых параметров без серьезных изменений в конструкции используемого оборудования и без снижения безопасности самого радиационного объекта. Изложено создание расчетной модели, основанной на сравнении динамики α -распада пробы с

некой калибровочной кривой распада, полученной для данного региона. В этом случае в более чем 70 раз сокращается время определения количества техногенных радиоактивных аэрозолей в атмосфере объекта.

The possibility of improving the methodology for measuring the content of radioactive aerosols in indoor air is considered in terms of reducing the time required for determining the required parameters without major changes in the design of the equipment used and without reducing the safety of the radiation facility itself. It is desirable to develop a computational model that compares the alpha decay dynamics of a sample with a specific decay calibration curve obtained for a given region. At the same time, the time for determining the amount of technogenic radioactive aerosols in indoor air is reduced by more than 70 times.

Существующая в нашей стране система обращения с радиоактивными отходами (РАО) сформировалась в процессе развития в СССР ядерных технологий и лежит в русле международных конвенций [1, 2], признанных Россией, но имеет ряд характерных особенностей, которые отличают ее от других стран [3–6]. Обеспечение ядерной и радиационной безопасности в России регулируется собственной правовой и организационной системой [7–11]. Технологии обращения с радиоактивными отходами и трудно растворимыми осадками рассмотрены в [12–15].

В результате вывода из эксплуатации атомных подводных лодок (АПЛ) происходит накопление их в пунктах базирования, в основном находящихся на арктическом побережье. Хранение на плаву с невыгруженными активными зонами реакторных установок создаёт источник радиационной опасности глобального масштаба [4]. В настоящее время организованы и функционируют промышленные предприятия по хранению и переработке отработавшего ядерного топлива АПЛ. Одним из важнейших аспектов надёжного функционирования таких предприятий является радиационная безопасность. Радиационная безопасность есть состояние защищённости настоящего и будущего поколений людей от вредного для их здоровья воздействия ионизирующего излучения [16].

Естественными носителями радиоактивности атмосферного воздуха являются эманации (радон, торон, актиний) и их дочерние продукты (радионуклиды полония, висмута, свинца и талия), которые могут осесть на взвешенных в воздухе частицах, тогда как твёрдые продукты распада эманаций в результате объёмной конденсации сами могут образовывать аэрозоли различной дисперсности. Радиоактивные аэрозоли образуются в процессах производства и обработки радиоактивных материалов (дробление, механическая обработка, выпаривание, кипячение и т. п.), при взрывах атомных и водородных бомб, при взаимодействии космического излучения с атмосферной пылью [6]. Несмотря на всевозможные защитные конструкции по задержанию радиоактивных газоаэрозолей (приточно-вытяжная вентиляция, боксы и т. п.), всё же какая-то часть их попадает в воздушную среду, а из неё в организм человека через органы дыхания. Некоторая часть их может всасываться в кровь [17].

На рис. 1 приведены данные эксперимента по измерению α -активности фоновых проб аэрозолей различного объёма, полученные по методике, показывающей динамику их распада. Видно, что временной промежуток, за который активность смеси радионуклидов в пробе уменьшается в 2 раза, составляет около 50 мин. Расчет активности дочерних радионуклидов для каждой эманации производился через каждый час. За начальное количество материнского радионуклида принято 100 Бк. Оценка динамики распада определялась по формуле [18]:

$$A_i(t) = A_1(0)\lambda_1\lambda_2 \dots \lambda_i \left[e^{\frac{-\lambda_1 t}{(\lambda_2 - \lambda_1)(\lambda_3 - \lambda_1) \dots (\lambda_i - \lambda_1)}} + \dots + e^{\frac{-\lambda_i t}{(\lambda_1 - \lambda_i)(\lambda_2 - \lambda_i) \dots (\lambda_{i-1} - \lambda_i)}} \right],$$

где A_i – активность дочернего радионуклида от материнского $A_1(0)$ через время t , Бк; λ – постоянная распада = $0,693/T_{1/2}$; $T_{1/2}$ – период полураспада.

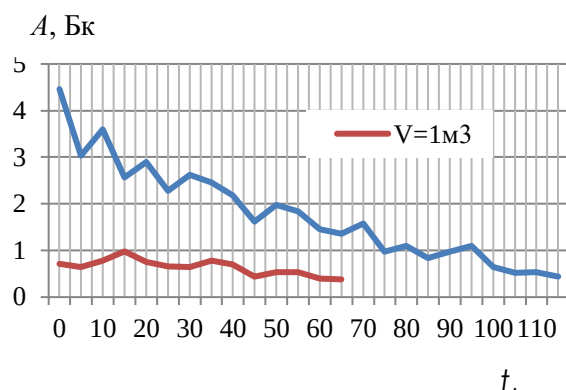


Рис. 1. Динамика распада естественных α -активных радионуклидов в пробах аэрозолей [16]

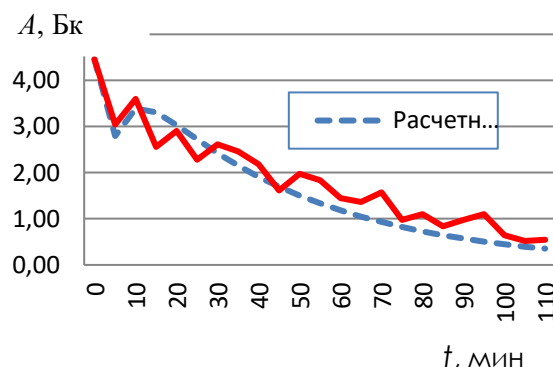


Рис. 2. Экспериментальные данные распада смеси естественных радионуклидов в сравнении с расчётной моделью [16]

В результате сравнения данных, полученных экспериментально с расчётными, можно говорить о том, что они удовлетворительно согласуются, с погрешностью измерения 30 %. Вместе с тем, динамика распада смеси радионуклидов в эксперименте несколько ниже, чем расчётная. Возможно, это связано с влиянием прочих естественных радионуклидов, не задействованных в расчёте.

Далее, с помощью той же формулы рассчитаем содержание свинца-214 в пробе через каждые пять минут, практически симулируя эксперимент. Данные расчёта приведены на диаграмме в сравнении с экспериментальными данными (рис. 2). Видно, что расчётная модель хорошо соотносится с экспериментальными данными. Таким образом, любое отклонение кривой экспериментальных данных вверх, от расчётной модели должно расцениваться, как обусловленное наличием техногенных радионуклидов в пробе. И такое отклонение, как видно из графиков, можно зафиксировать уже после получасовой выдержки. При этом само измерение не столь важно, необходимо фиксировать динамику распада в первые часы после отбора проб и чётко фиксировать отклонения от калибровочной кривой. Сделать это представляется возможным без конструктивного изменения оборудования. Изменениям подвергнется лишь алгоритм измерений.

Следовательно, необходимо и возможно создание расчётной модели, сравнивающей динамику α -распада пробы с некой калибровочной кривой распада, полученной для данного региона. И тогда можно уже через полчаса сделать вывод о наличии и конкретном количестве техногенных радиоактивных аэрозолей в воздухе помещений, тем самым сократив время определения в 72 раза.

Литература

1. Объединенная конвенция о безопасности обращения с отработавшим топливом и безопасности обращения с радиоактивными отходами. Вена, 5 сентября 1997 года. Конвенция вступила в силу для России 19.04.2006. <http://www.bellona.ru/Casefiles/vienna97>.
2. Конвенция о ядерной безопасности. Вена, 17 июня 1994 года. Конвенция вступила в силу для России 24.10.1996. <http://www.bellona.ru/Casefiles/-vienna94>.
3. Ключников А. А., Пазухин Э.М., Шигера Ю.М., Шигера В.Ю. Радиоактивные отходы АЭС и методы обращения с ними. К.: Институт проблем безопасности АЭС НАН Украины, 2005. – 487 с.
4. Лебедев В.М. Ядерный топливный цикл. М.: Энергоатомиздат, 2005. – 305 с.
5. Кулагина Т.А., Кулагин В. А., Матюшенко А. И. Техносферная безопасность в ядерной энергетике. Красноярск: Изд-во «Гротеск», СФУ, 2014. – 286 с.
6. Кулагина Т.А., Козин О.А., Матюшенко А. И. Экологическая безопасность техносферных объектов. Красноярск: Изд-во «Гротеск», 2015. – 323 с.
7. ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ЗАКОН от 21.11.95 N 170-ФЗ (ред. от 02.07.2013 с изменениями, вступившими в силу 02.09.2013) «ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ».

8. Безопасность России. Правовые, социально-экономические и научно-технические аспекты. Регулирование ядерной и радиационной безопасности / Колл. авт. М.: МГОФ «Знание», НТЦ ЯРБ, 2003. 400 с.
9. Дорофеев А. Н. О ходе работ по развитию нормативно-правовой базы в области обращения с радиоактивными отходами // Радиоактивные отходы. 2019. № 3(8). С. 6–13. DOI: 10.25283/2587-9707-2019-3-6-13.
10. Стратегия развития ядерной энергетики России до 2050 года и перспективы на период до 2100 года. Одобрено решением Президиума НТС ГК Росатом. 26 декабря 2018 г. М., 62 с.
11. Большов Л.А., Линге И. И. О согласовании этапов развития атомного энергопромышленного комплекса и системы обращения с РАО // Радиоактивные отходы. 2019. № 3(8). С. 14–27. DOI: 10.25283/2587-9707-2019-3-14-27.
12. Кулагина Т.А., Кулагин В. А., Москвичев В. В., Попков В. А. Применение кавитационной технологии в процессах обращения с отработавшим ядерным топливом // Экология и промышленность России. 2016. Т. 20. № 10. С. 4–10. DOI: 10.18412/1816-0395-2016-10-4-10.
13. Шеленкова В. В., Кулагина Т.А. Совершенствование технологии дезактивации оборудования с радиоактивным загрязнением // Радиоактивные отходы. 2021. № 1(14). С. 28–38. DOI: 10.25283/2587-9707-2021-1-28-38.
14. Кулагина Т.А., Козин О.А., Попков В. А. Обращение с радиоактивными отходами. Красноярск: Гротеск, СФУ, 2018. – 183 с.
15. Кулагина Т.А., Кулагин В. А. Растворение алюмосиликатных осадков в хранилищах жидких РАО // Радиоактивные отходы. 2020. № 2 (11). С. 75–84. DOI: 10.25283/2587-9707-2020-2-75-84.
16. Кулагина Т.А., Иванов С.А. О сокращении времени определения содержания радиоактивных аэрозолей в воздухе производственных помещений // Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии, 2020. 13(8). С. 965–976. DOI: 10.17516/1999-494X-0276.
17. Жабо В. В. Охрана окружающей среды на ТЭС и АЭС. М.: Энергоатомиздат, 1992.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОСХОДЯЩЕГО ФИЛЬТРАЦИОННОГО ПОТОКА СМЕСИ ВОДЫ И ТВЕРДЫХ ЧАСТИЦ С УЧЕТОМ ПРОЦЕССОВ ВНУТРЕННЕЙ СУФФОЗИИ

Сибин А. Н., Папин А. А.
Алтайский государственный университет
Барнаул, Россия

В докладе рассматривается одномерная начально-краевая задача фильтрации грунтовых вод с учетом внутренней эрозии грунта. Предложен алгоритм численного решения задачи и проведены тестовые численные расчеты. Математическая модель откалибрована на экспериментальных данных из литературных источников.

The one-dimensional initial boundary-value problem of groundwater filtration is studied with internal soil erosion. The algorithm of numerical solution of the problem is taken into account is proposed. The numerical test calculations are carried out. The mathematical model is calibrated to the experimental data available in the literature.

Если через слой неподвижных твердых частиц пропускать восходящий поток жидкости, постепенно увеличивая его скорость, то при определенной скорости, называемой критической, мелкая фракция перейдет в псевдооживленное состояние (процесс внутренней суффозии [1]). При этом мелкие твердые частицы приобретут подвижность и будут перемещаться между более крупными частицами.

Доклад посвящен численному исследованию одномерной задачи фильтрации смеси воды и твердых подвижных частиц (псевдооживленное состояние [2]) в недеформируемом грунте при постоянной температуре в потоке и с учетом процессов внутренней суффозии [3]. Грунт моделируется как трехфазная сплошная пористая среда. Поры полностью заполнены смесью воды и подвижных частиц грунта. Доля пор в грунте определяется пористостью. В основе математической модели лежат уравнения сохранения массы для каждой из фаз, а также аналог закона Дарси для воды и подвижных твердых частиц и соотношение для интенсивности суффозионного

потока [1]. Подвижные частицы грунта рассматривались как отдельная фаза, имеющая свою скорость фильтрации, которая определяется в ходе решения задачи. Данное предположение позволило построить замкнутую модель (постановка задачи подробно изложена в работе [4]).

Особенностью рассматриваемой задачи являются: изменяющаяся пористость грунта в результате процесса внутренней суффозии (пористость может изменяться, в частности, из-за деформации грунта, см. работы [5, 6]) и возможное вырождение на решении уравнения для водонасыщенности [7]. Кроме того, пористость и водонасыщенность должны удовлетворять физическим принципам максимума.

В работе [4] рассматривалась одномерная задача движения смеси твердых частиц и жидкости в пористых средах с учетом внутренней суффозии без учета влияния силы тяжести (экспериментальная установка располагалась горизонтально). В данной работе рассматривается случай, когда труба заполненная грунтом расположена вертикально. Численно исследовано влияние силы тяжести на суффозионный процесс. На нижней границе рассматриваемой области задается постоянный напор воды. Фильтрующаяся смесь замедляется из-за увеличения пористости (пористость увеличивается, так как, частицы грунта выносятся из области фильтрации). Замедление изменения пористости связано с замедлением суффозионного процесса (многочисленные эксперименты показали, что интенсивность суффозионного процесса пропорциональна скорости фильтрации [8]). После 250 минут пористость практически не изменяется, концентрация подвижных частиц грунта убывает (см. рис. 1).

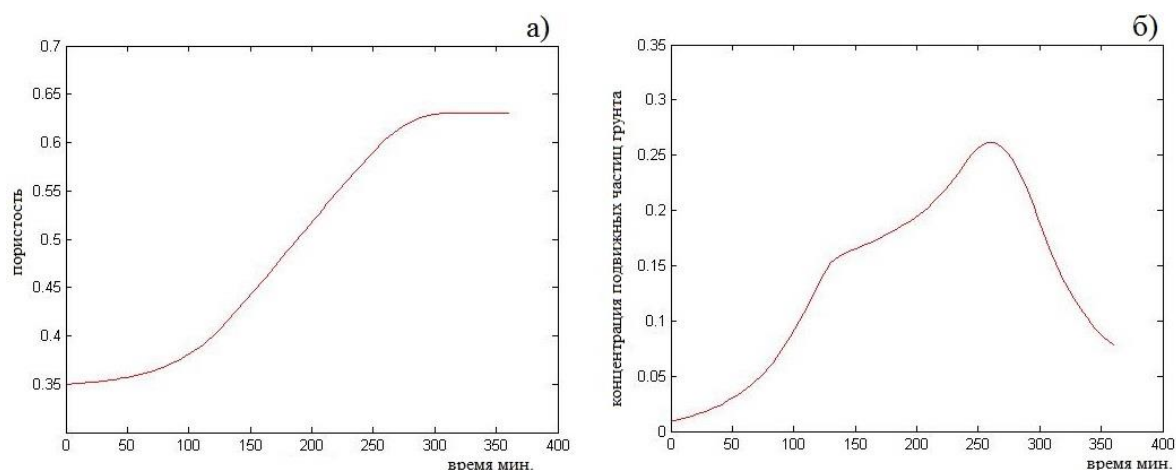


Рис. 1. Изменение пористости (а) и концентрации подвижных частиц грунта (б) на верхней границе рассматриваемой области

Рассматриваемая в данной работе задача может быть использована для моделирования суффозионного процесса на участках разгрузки восходящего фильтрационного потока (например, при выходе потока в дренажную канаву), а также процессов фильтрации в скважинах [9].

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ по теме «Современные методы гидродинамики для задач природопользования, промышленных систем и полярной механики» (номер темы: FZMW-2020-0008)

Литература

1. Vardoulakis I. Sand production // Geomechanics in energy production. – 2006. – Vol. 10, No. 6. Pp. 817 – 828.
2. Протоdjяконов И.О., Чесноков Ю.Г. Гидромеханика псевдооживленного слоя. Л.: Химия, 1982 – 264 с.
3. Сибин А. Н., Сибин Н. Н. Численное решение одномерной задачи фильтрации с учетом суффозионных процессов // Изв. Алтайского государственного университета. – 2017. – № 1 (93). – С. 123-126.

1. Папин А. А., Сибин А. Н. Моделирование движения смеси твердых частиц и жидкости в пористых средах с учетом внутренней суффозии // Изв. РАН. Механика жидкости и газа. – 2019. – № 4. – С. 82-94.
4. Tokareva M.A. Solvability of initial boundary value problem for the equations of filtration in poroelastic media // Journal of Physics: Conference Series. – 2016. Vol.722, No. 1. – 012037.
5. Вирц Р. А. Численное решение двумерной задачи фильтрации жидкости в деформируемой пористой среде // Изв. Алтайского государственного университета. – 2021. – № 1 (117). – С. 88 – 92.
6. Сибин А. Н., Папин А. А. Тепломассоперенос в тающем снеге // ПМТФ. – 2021. – Т 62, № 1. – С. 109–118.
7. Chetti A., Benamar A., Hazzab A. Modeling of Particle Migration in Porous Media: Application to Soil Suffusion // Transport in Porous Media. – 2016. – Vol. 113, No. 3. Pp. 591 – 606.
8. Бондарев Э. А., Красовицкий Б. А. Температурный режим нефтяных и газовых скважин. Наука: Сиб. отделение, 1974 – 87 с.

ОБ ОДНОЙ ПОЛУНЕЛОКАЛЬНОЙ КРАЕВОЙ ЗАДАЧЕ ДЛЯ ТРЕХМЕРНОГО УРАВНЕНИЯ ЧАПЛЫГИНА В ПРИЗМАТИЧЕСКОЙ НЕОГРАНИЧЕННОЙ ОБЛАСТИ

Джамалов С. З., Ашуров Р. Р., Туракулов Х. Ш.
Институт математики АН Республики Узбекистан
Ташкент, Узбекистан

В данной статье изучаются методами « ε – регуляризации» и априорных оценок с применением преобразования Фурье однозначная разрешимость обобщенного решения одной полунелокальной краевой задачи для трехмерного уравнения Чаплыгина в призматической неограниченной области.

In this paper we study, the unique solvability of the generalized solution of one seminonlocal boundary value problem for the three-dimensional Chaplygin equation in a prismatic unbounded domain by the methods of “ ε -regularizations”, and a priori estimates using the Fourier transform.

Как известно, в работе А. В. Бицадзе показано, что задача Дирихле для уравнения смешанного типа некорректна [1]. Естественно возникает вопрос: нельзя ли заменить условия задачи Дирихле другими условиями, охватывающими всю границу, которые обеспечивают корректность задачи? Впервые такие краевые задачи (нелокальные краевые задачи) для уравнения смешанного типа были предложены и изучены в работе Ф.И.Франкля при решении газодинамической задачи об обтекании профилей потоком дозвуковой скорости со сверхзвуковой зоной, оканчивающейся прямым скачком уплотнения [2]. Близкие по постановке задач, для уравнения Чаплыгина были исследованы в ограниченных областях в работах [3]–[7].

В данной работе с использованием результатов работ [6], [7] изучается однозначная разрешимость обобщенного решения одной полунелокальной краевой задачи для трехмерного уравнения Чаплыгина в призматической неограниченной области.

В

области

$$Q = (-\alpha, \beta) \times (0, T) \times \mathbb{R} = Q_1 \times \mathbb{R} = \{(x, t, z); x \in (-\alpha, \beta), 0 < t < T < +\infty, z \in \mathbb{R}\},$$

где $0 < \alpha < \beta < +\infty$, рассмотрим уравнение Чаплыгина:

$$Lu = K(x)u_{tt} - \Delta u + a(x, t)u_t + c(x, t)u = f(x, t, z), \quad (1)$$

где $x \cdot K(x) > 0$, при $x \neq 0$, $-\alpha < x < \beta$, $\Delta u = u_{xx} + u_{zz}$ – оператор Лапласа.

Пусть все коэффициенты уравнения (1) достаточно гладкие функции в Q .

Полунелокальная краевая задача периодического типа.

Найти решение $u(x, t, z)$ уравнения (1) из пространства $W_2^{2,3}(Q)$, удовлетворяющее следующим краевым условиям

$$\gamma D_t^p u|_{t=0} = D_t^p u|_{t=T}, \quad (2)$$

$$u|_{x=-\alpha} = u|_{x=\beta} = 0, \quad (3)$$

при $p = 0, 1$, где $D_z^p u = \frac{\partial^p u}{\partial z^p}$, $D_z^0 u = u$, γ – некоторые постоянные числа, отличные от нуля, величины которых будет уточнены ниже.

Определение. Обобщённым решением задачи (1)-(3) будем называть функцию $u(x, t, z) \in W_2^{2,3}(Q)$, удовлетворяющее почти всюду уравнению (1) с условиями (2)-(3).

Теорема. Пусть выполнены следующие условия для коэффициентов уравнения (1); $2a(x, t) + \mu K(x) > \delta_1 > 0$, $\mu c(x, t) - c_t(x, t) > \delta_2 > 0$, для всех $(x, t) \in \overline{Q_1}$, где $\mu = \frac{2}{T} \ln |\gamma| > 0$ при $|\gamma| > 1$, $a(x, 0) = a(x, T)$, $c(x, 0) = c(x, T)$. Тогда для любой функции $f \in W_2^{1,3}(Q)$, такой, что $\gamma \cdot f(x, 0, z) = f(x, T, z)$, существует единственное обобщённое решение задачи (1)-(3) из пространства $W_2^{2,3}(Q)$, и для решения задачи (1)-(3) справедливы следующие оценки:

$$I) \quad \|u\|_{W_2^{1,3}(Q)}^2 \leq c_1 \|f\|_{W_2^{0,3}(Q)}^2$$

$$II) \quad \|u\|_{W_2^{2,3}(Q)}^2 \leq c_2 \|f\|_{W_2^{1,3}(Q)}^2$$

где c_i – положительные, вообще говоря, разные постоянные числа, отличные от нуля.

Здесь через $W_2^{l,s}(Q)$, обозначено гильбертово пространство с нормой

$$\|u\|_{W_2^{l,s}(Q)}^2 = (2\pi)^{-1/2} \cdot \int_{-\infty}^{+\infty} (1 + |\lambda|^2)^s \cdot \|\hat{u}\|_{W_2^l(Q_1)}^2 d\lambda,$$

где $W_2^l(Q_1)$ – пространство Соболева, с нормой $\|g\|_{W_2^l(Q_1)}^2 = \sum_{|\alpha| \leq l} \int_{Q_1} |D^\alpha g|^2 dx dt$, α –

это мультииндекс, D^α – есть обобщённая производная по переменным x и t ,

а через $\hat{u}(x, t, \lambda) = (2\pi)^{-1/2} \int_{-\infty}^{+\infty} u(x, t, y) e^{-i\lambda y} dy$ обозначено преобразование Фурье, функции $u(x, t, z)$.

Замечание. Результат справедливо для многомерного уравнения Чаплыгина.

Литература

1. Бицадзе А. В. Некорректность задачи Дирихле для уравнений смешанного типа // ДАН СССР, 1953, Т.122, №2, с.167-170.
2. Франкль Ф.И. Обтекание профилей потоком дозвуковой скорости со сверхзвуковой зоной, оканчивающейся прямым скачком уплотнения. // Прикладная математика и механика. 1956, т.20, №2, С.196-202.
3. Кальменов Т.Ш. О полупериодической задаче для многомерного уравнения смешанного типа // Дифференциальные уравнения. 1978. т.14, №3, с546-548.
4. Сабитов К.Б. Задача Дирихле для уравнений смешанного типа в прямоугольной области. // Док. РАН.2007. Т.13. №1, с.23-26.

5. Цыбиков.Б.Н. О корректности периодической задачи для многомерного уравнения смешанного типа. // В. кн.: Неклассические уравнения математической физики. Новосибирск, 1986, с.201-206
6. Джамалов.С.З. Об одной нелокальной краевой задаче с постоянными коэффициентами для многомерного уравнения смешанного типа первого рода //Вестник Самарского государственного технического университета, Сер. физ.-мат. науки, 2017,т.21, №4, С.1-14.
7. Джамалов С.З., Ашуров Р.Р. О гладкости одной нелокальной краевой задачи для многомерного уравнения Чаплыгина в пространстве. // Казахский математический журнал. -2018г, Т18, №2, С.59-70.

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СИСТЕМ ТЕПЛОВЫХ ТРУБ ДЛЯ ОХЛАЖДЕНИЯ ЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ

Кулагин В. А., Соколов Н. Ю.
Сибирский федеральный университет
Красноярск Россия

Приведены результаты оптимизации одиночной плоской тепловой трубы в систему тепловых труб. Сравнение произведено при одинаковой температуре, занимаемом объеме и для определенной максимальной температуры аппаратуры. Определены предельные значения отводимой тепловой мощности одиночной тепловой трубы, двухуровневой и трехуровневой систем тепловых труб с разными теплоносителями. Предложена универсальная математическая модель для численного исследования термодинамических характеристик систем, состоящих из тепловых труб, дополненная методом оптимизации.

We report on the results of optimizing a single flat heat pipe into an arrangement of heat pipes. A comparison is drawn at the same temperatures and occupied volumes and for a specific maximum temperature of radio-electronic devices. The end result of our studies is that the limiting heat transfer capacity has been found for a single heat pipe and two- and three-level heat pipe assemblies with various heat transfer media. Versatility of the mathematical model enhanced by the optimization method has been proved.

Одним из неперемных условий надежного функционирования электронной аппаратуры (ЭА) в любых климатических условиях от тропиков до Арктики является обеспечение необходимого теплового режима всех ее компонентов. Основной принцип функционирования системы обеспечения теплового режима заключается в поддержании требуемого диапазона температур на посадочных местах тепловыделяющего оборудования при заданных энергопотреблениях. Обеспечение теплового режима современной ЭА негерметичного исполнения, например, спутников связи с увеличенным сроком активного существования, достигается с помощью тепловых труб (ТТ) [1–4]. Наиболее предпочтительным средством реализации принципа естественной, нерегулируемой передачи тепловой мощности являются ТТ, работающие на основе замкнутого испарительно-конденсационного цикла. Тепловые трубы отличаются высокой эффективной теплопроводностью, в десятки раз превышающей теплопроводность металлов [5, 6]. Они обеспечивают эффективный отвод тепла от теплонагруженных электрорадиоизделий (ЭРИ), позволяют трансформировать плотность тепловых потоков, разнести в пространстве источник и приемник теплоты, стабилизировать температуру и уменьшить неравномерность температурного поля по конструкции ЭА. Прорывным научно-техническим решением, которое обеспечило эффективный отвод тепла от всех ЭРИ ЭА, являются гипертеплопроводящие секции (ГТПС) [7] – новый класс тепловых труб, представляющий собой плоскую тонкую герметичную конструкцию, внутри которой находится фитиль из спеченного металлического порошка, заполненный жидким теплоносителем.

При функционировании ГТПС обычно конвективный механизм переноса тепла является доминирующим. Однако требуется учитывать случаи, когда конвективный

перенос тепла становится неэффективным (при температурах теплоносителя близких к точке замерзания) или в случае прекращения движения теплоносителя (осушение фитиля, замерзание теплоносителя или блокирование паровых каналов неконденсирующимися газами). В этом случае необходимо учитывать перенос тепла за счет теплопроводности конструкции ГТПС (корпуса и фитиля). Система уравнений в области ГТПС имеет вид:

$$\operatorname{div}(-d\lambda \nabla T(x, y)) + g(x, y)T(x, y) + g_c(x, y) = f(x, y), \quad (1)$$

$$\operatorname{div}\left(d_{hp} \frac{\rho_v}{\mu_v} K_v \nabla P_v\right) = -\frac{q(x, y)}{L}, \quad (2)$$

$$\operatorname{div}\left(d_{hp} \frac{\rho_l}{\mu_l} K_l \nabla P_l\right) = \frac{q(x, y)}{L}, \quad (3)$$

где $T(x, y)$ – распределение температуры; $d\lambda$ – произведение толщины и эффективной теплопроводности конструкции тепловой трубы (при отсутствии циркуляции теплоносителя); $g(x, y)$ и $f(x, y)$ – коэффициенты, учитывающие внешние потоки тепла (тепловыделение ЭРИ, сток тепла, слагаемые для радиационных потоков тепла и пр.); $q(x, y)$ – поглощаемое испаряющимся теплоносителем в тепловой трубе тепло (Вт/м^2); $P_l(x, y)$ и $P_v(x, y)$ – давления в жидкостной и паровой фазах теплоносителя; L – скрытая теплота парообразования теплоносителя; μ и ρ – вязкость и плотность фаз теплоносителя; K_l, K_v – коэффициенты (в общем случае тензоры), определяющие проницаемость капиллярной структуры тепловой трубы для жидкости и пара.

Для решения системы (1)–(3) дополнительно используется соотношение $\nabla P_v = \frac{\partial P_v}{\partial T_v} \nabla T_v$, указывающее, что пар внутри тепловой трубы находится на линии насыщения. При этом зависимость производной давления насыщенного пара по температуре может задаваться как отдельная характеристика теплоносителя. Величина $q(x, y)$, в общем случае, сложным образом зависит от состояния теплоносителя, и в том числе от распределения температуры $T(x, y)$. Система уравнений (1)–(3) решается итерационно, при этом на каждой итерации после расчета распределения давлений жидкости и пара проверяется следующее условие:

$$P_v(x, y) - P_l(x, y) < P_c, P_c = \frac{2\sigma \cos \theta}{r_c}, \quad (4)$$

где r_c – радиус пор фитиля, σ – коэффициент поверхностного натяжения, θ – предельный угол смачивания материала фитиля теплоносителем. В области, где условие (4) не выполняется, фитиль осушается, и поглощение тепла при испарении прекращается. Величина q в этой области принимается равной нулю для последующих итераций. Аналогично учитывается условие на замерзание теплоносителя: $T(x, y) > T_0$, где T_0 – температура замерзания.

Разработанный программный комплекс оснащен графическим интерфейсом, обеспечивающим удобную работу с программой, задание входных параметров, получение и анализ результатов расчетов.

В результате проведенных исследований были определены предельные значения отводимой тепловой мощности одиночной ТТ, двухуровневой и трехуровневой СТТ с разными теплоносителями. Подтверждена универсальность математической модели, представленной в работе [2] и дополнена методом оптимизации.

Литература

1. Дан П.Д., Рей Д.А. Тепловые трубы: пер. с англ. М.: Энергия, 1979. – 272 с.
2. Деревянко В. А., Нестеров Д.А., Косенко В.Е. и др. Плоские тепловые трубы для отвода тепла от электронной аппаратуры в космических аппаратах // Вестник СибГАУ. 2013. № 6(52). С. 111–116.
3. Кулагин В. А., Соколов Н.Ю. Система тепловых труб в составе радиоэлектронного оборудования космического аппарата // Журнал сиб. федер. ун-та. Техника и технологии. 2021. 14(4). С. 456–468.
4. Kulagin V.A., Sokolov N.Yu. Improving the of thermophysical characteristics of heat pipes. J. Sib. Fed. Univ. Eng. technol., 2017, 10(3), 372-376. DOI: 10.17516/1999-494X-2017-10-3-372-376.

5. Лукс А. Л., Матвеев А. Г. Анализ основных расчетных и экспериментальных теплофизических характеристик аммиачных тепловых труб повышенной тепловой проводимости из алюминиевых сплавов // Вестник СамГУ. Естественнонаучная серия. 2008. № 3(62). С. 331–357.
6. Лукс А. Л., Матвеев А. Г., Зеленцов Д. В. Методика расчета тепловых труб, отводящих тепло от тепловыделяющей поверхности // Градостроительство и архитектура. 2018. Т. 8. № 1(30). С. 35–39.
7. Пат. 2403692 РФ, МПК H05K 1/00, H05K 7/20. Модуль радиоэлектронной аппаратуры с гипертеплопроводящим основанием / Сунцов С.Б., Косенко В.Е., Деревянко В. А.; заявитель и патентообладатель ОАО ИСС. № 2009116488/07; заявл. 29.04.2009; опубл. 10.11.2010, Бюл. № 31.
8. Кулагин В. А., Соколов Н.Ю. Численное исследование характеристик тепловых труб в составе радиоэлектронного оборудования космических аппаратов // Журнал сиб. федер. ун-та. Техника и технологии. 2015. 8(6). 769–773. DOI: 10.17516/1999-494X-2015-8-6-769-773.

ГИДРОДИНАМИКА СУПЕРКАВИТАЦИОННОГО ИСПАРИТЕЛЯ С УЧЕТОМ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ ЭФФЕКТОВ

Кулагин В. А., Пьяных Т. А.
Сибирский федеральный университет
Красноярск, Россия

Предложена математическая модель, позволяющая проводить расчетные исследования кавитационных течений с учетом термодинамических эффектов. Проведено численное моделирование рабочих процессов суперкавитационного испарителя. Анализ зависимости числа кавитации от температуры показал, что с уменьшением температуры интенсивность кавитации в потоке воды понижается. При повышении температуры воды, поступающей в рабочий участок суперкавитационного испарителя, и увеличении пароотбора из каверны, влияние термодинамических эффектов усиливается. Полученные расчетные результаты хорошо согласуются с экспериментальными данными. A mathematical model has been proposed that makes it possible to carry out computational studies of cavitation flows taking into account thermodynamic effects. Numerical modeling of the working processes of a supercavitation evaporator has been carried out. Analysis of the dependence of the number of cavitation on temperature showed that with a decrease in temperature, the intensity of cavitation in the water flow decreases. With an increase in the temperature of the water entering the working section of the supercavitation evaporator and an increase in steam extraction from the cavity, the influence of thermodynamic effects increases. The calculated results are in good agreement with the experimental data.

Один из перспективных способов обессоливания воды – применение суперкавитационных испарителей. Процесс испарения в аппаратах суперкавитирующего типа осуществляется за счет создания развитого кавитационного течения при обтекании недогретой жидкостью кавитатора с последующим отбором пара из образовавшихся каверн. Высокая интенсивность теплообмена по сравнению с другими способами генерирования пара объясняется особенностями процесса испарения с поверхности каверны [1–9].

Для моделирования рабочих процессов суперкавитационного испарителя использовали модель двухфазного гомогенного потока [5, 8], которая основывается на предположении локального кинематического и термодинамического равновесия между фазами и отсутствия поверхности раздела между паром и водой. Также пренебрегаем выделением теплоты за счет вязкого трения, при этом температурное поле определяется только испарением и конденсацией. Кавитационное течение жидкости в этом случае описывается уравнениями неразрывности, сохранения момента импульса, уравнением сохранения энергии и уравнением переноса жидкой фазы, представленными в стационарном виде. Численное решение задачи проводилось с использованием метода контрольного объема при помощи программы ANSYS CFX [10].

Область фазового перехода объемной доли пара в потоке смеси имеет довольно тонкую границу (рис. 1, а), что объясняется высокими градиентами давления в этой области (рис. 1, в). Расчетная длина каверны для заданных условий составила 12 мм. Температура в каверне уменьшилась относительно температуры на входе в рабочий участок приблизительно на 38 °С, а в области замыкания каверны увеличилась на 24 °С (рис. 1, б), что объясняется повышением давления в этой области и завихрением: в месте замыкания каверны в небольшом объеме достаточно высокое тепловыделение за счет конденсации пара, что является причиной роста температуры. Как показали результаты расчета, заданный отбор пара из каверны не приводит к разрушению каверны, что объясняется интенсивным испарением на ее поверхности и устойчивой граничной динамикой.

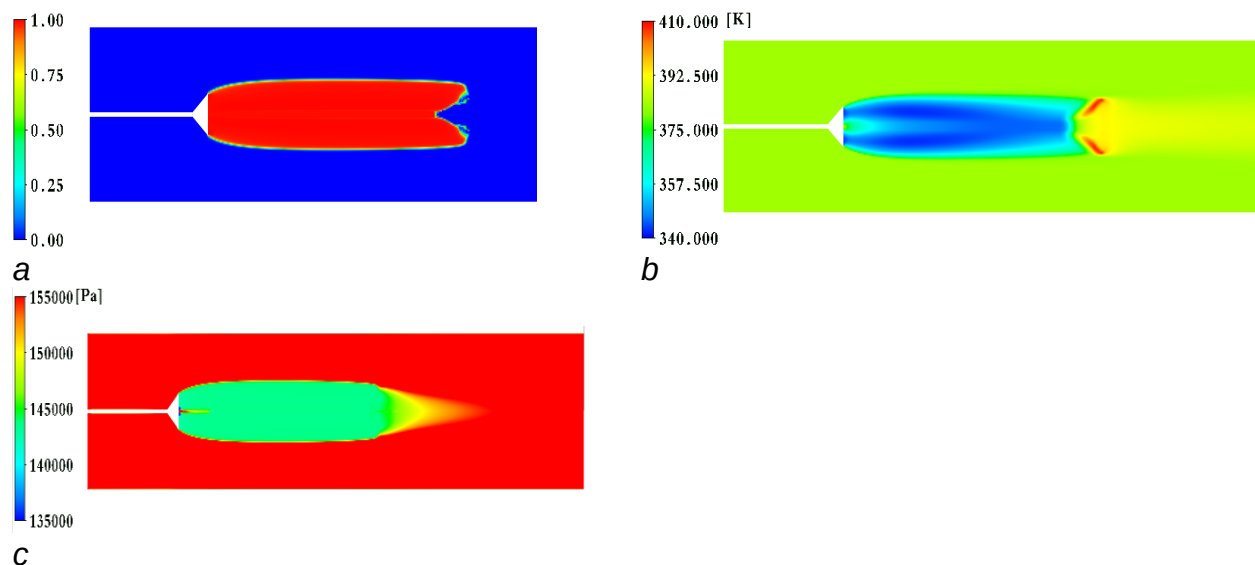


Рис. 1. Результаты расчета: а – доля пара, б – поле температуры, с – поле давления

Анализ зависимости числа кавитации от температуры показал, что с уменьшением температуры интенсивность кавитации в потоке воды понижается. При повышении температуры воды, поступающей в рабочий участок суперкавитационного испарителя, и увеличении пароотбора из каверны влияние термодинамических эффектов усиливается.

Разработанная математическая модель, позволяет проводить расчетные исследования кавитационных течений с учетом термодинамических эффектов. Проведено моделирование рабочих процессов суперкавитационного испарителя. Полученные расчетные результаты хорошо согласуются с экспериментальными данными.

Литература

1. Кулагин В. А., Москвичев В. В., Махутов Н.А., Маркович Д.М., Шокин Ю.И. Физическое и математическое моделирование в области гидродинамики больших скоростей на экспериментальной базе Красноярской ГЭС // Вестник Российской академии наук. 2016. Т. 86, № 11, С. 978–990: DOI: 10.7868/S0869587316110062 (SCOPUS, WoS; IF 6.603, Q1).
2. Zhi-Ying Zheng, Qian Li, Lu Wang, Li-Ming Yao, Wei-Hua Cai, Vladimir A. Kulagin, Hui Li, Feng-Chen Li Numerical study on the effect of steam extraction on hydrodynamic characteristics of rotational supercavitating evaporator // Desalination 455 (2019) 1–18; doi.org/10.1016/j.desal.2018.12.012 (SCOPUS, WoS; IF 6.603, Q1).
3. Qian Li, Zhi-Ying, Feng-Chen Li, Vladimir A. Kulagin Numerical study on the characteristics of natural supercavitation by planar symmetric wedge-shaped cavitators for rotational supercavitating evaporator // Science China Technological Sciences. 2015. Vol. 58. Issue 6. P. 1072–1083; doi: 10.1007/s11431-015-5827-y (SCI, EI indexed, IF 1.192).

4. Likhachev D.S., Li Feng-Chen, Vladimir A. Kulagin Experimental study of thermohydrodynamic characteristics of a rotational supercavitating evaporator for desalination // Sci. China. Tech. Sci., 2014, 57: 2115–2130, doi: 10.1007/s11431-014-5631-0 (SCI, EI indexed, Impact Factor: 1.113).
5. Kulagin V.A., Pyanykh T.A. Modeling of processes in supercavitation evaporator with consideration of thermodynamic effects // Chemical and Petroleum Engineering. Vol. 50. 2014. P. 24–29. DOI 10.1007/s10556-014-9848-3.
6. Кулагин В. А. Гидродинамические воздействия на жидкости, золи, смеси и твердые границы потоков // Вестник КГТУ. Вып.8. Красноярск: Изд. КГТУ, 1997.
7. Ивченко В.М., Кулагин В. А., Есиков С.А., Лаврик Н.Л. Кинетика кавитационного воздействия на элементы гидротехнических сооружений и гидроэнергетического оборудования // Известия ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева. Т. 200. Л.: Энеоатомиздат, 1987. С. 43–48.
8. Кулагин В. А., Пьяных Т.А. Исследование кавитационных течений средствами математического моделирования // Журнал сиб. федер. ун-та. Техника и технологии. 2012, 5(1), С. 57–62.
9. Kulagin V.A., Sapoghnikova E.S., Stebeleva O.P., Kashkina L.V., Zheng Zhi-Ying, Li Qian, Li Feng-Chen Features of influence of cavitation effects on the physicochemical properties of water and wastewater // J. Sib. Fed. Univ. Eng. technol., 2014, 7(5). С. 605–614.
10. Goel T., Zhao J., Thakur S., Haftka R.T., Shyy W., Zhao J. // International Journal for Numerical Methods in Fluids. 2008. V. 58. P. 969–1007.

НЕЛОКАЛЬНАЯ КРАЕВАЯ ЗАДАЧА ДЛЯ УРАВНЕНИЯ СМЕШАННОГО ТИПА

Рузиев М. Х.
Институт Математики АНРУз
Ташкент, Узбекистан

В работе изучается задача со сдвигами для уравнения Геллерстедта с сингулярным коэффициентом. Единственность решения задачи доказывается с помощью принципа экстремума. При доказательстве существования решения задачи применяются теория сингулярных интегральных уравнений, уравнения Винера-Хопфа и интегральные уравнения Фредгольма.

In this paper we study a problem with a shift for Gellerstedt equation with singular coefficient. We prove the unique solvability of the mentioned problem with the help of the extremum principle. The proof of the solvability is based on the theory of singular integral equations, Wiener-hopf equations and Fredholm integral equations.

Рассмотрим уравнение

$$\operatorname{sign} y |y|^m u_{xx} + u_{yy} + \frac{\beta_0}{y} u_y = 0, \quad (1)$$

в области $D = D^+ \cup D^- \cup I$ комплексной плоскости $z = x + iy$, где D^+ – первый квадрант плоскости, D^- – конечная область четвертый квадрант плоскости, ограниченная характеристиками OC и BC уравнения (1) выходящими из точек $O(0,0)$, $B(1,0)$ и отрезком OB прямой $y=0$, $I = \{(x,y): 0 < x < 1, y=0\}$. В (1) m, β_0 – некоторые действительные числа, удовлетворяющие условиям $m > 0$, $-\frac{m}{2} < \beta_0 < 1$.

Введем обозначения:

$J_0 = \{(x,y): 0 < y < \infty, x=0\}$, $J_1 = \{(x,y): 1 < x < \infty, y=0\}$, C_0 и C_1 – соответственно точки пересечения характеристик OC и BC с характеристикой исходящей из точки $E(c,0)$, где $c \in I$ – произвольное фиксированное число. Пусть

$p(x) \in C^1[0, c]$ – диффеоморфизм из множества точек отрезка $[0, c]$ в множество точек отрезка $[c, 1]$, причем $p'(x) < 0$, $p(0) = 1$, $p(c) = c$. В качестве примера такой функции приведем линейную функцию $p(x) = 1 - kx$, где $k = \frac{1-c}{c}$.

Задача В. Найти в области D функцию $u(x, y)$ со свойствами:

- 1) $u(x, y) \in C(\bar{D})$, где $\bar{D} = \bar{D}^- \cup D^+ \cup \bar{I}_0 \cup \bar{I}_1$;
- 2) $u(x, y) \in C^2(D^+)$ и удовлетворяет уравнению (1) в этой области;
- 3) $u(x, y)$ является обобщенным решением класса R_1 [1] в области D^- ;
- 4) выполняются равенства

$$\lim_{R \rightarrow \infty} u(x, y) = 0, \quad R^2 = x^2 + \frac{4}{(m+2)^2} y^{m+2}, \quad x \geq 0, \quad y \geq 0;$$

- 5) $u(x, y)$ удовлетворяет краевым условиям

$$u(0, y) = \varphi(y), \quad y \geq 0,$$

$$u(x, 0) = \tau_1(x), \quad x \in \bar{J}_1,$$

$$u[\theta_0(x)] + \mu u[\theta_1(p(x))] = \psi(x), \quad 0 \leq x \leq c,$$

$$u(p(x), 0) = \rho u(x, 0) + f(x), \quad 0 \leq x \leq c,$$

и условию сопряжения

$$\lim_{y \rightarrow +0} y^{\beta_0} u_y = \lim_{y \rightarrow -0} (-y)^{\beta_0} u_y, \quad x \in I \setminus \{c\}, \quad \text{причем эти пределы при } x=0, \quad x=1, \quad x=c \text{ мо-}$$

гут иметь особенности порядка ниже $1-2\beta$, где $\beta = \frac{m+2\beta_0}{2(m+2)}$,

$$f(x) \in C[0, c] \cap C^{1, \delta_1}(0, c), \quad f(0) = 0, \quad f(c) = 0, \quad \psi(x) \in C[0, c] \cap C^{1, \delta_2}(0, c), \quad \psi(0) = 0,$$

$\tau_1(x) \in C(\bar{J}_1)$ причем функцию $\tau_1(x)$ в окрестности точки $x=1$ представима в виде

$$\tau_1(x) = (1-x)\tilde{\tau}_1(x), \quad \tilde{\tau}_1(x) \in C(\bar{J}_1), \quad \text{и при достаточно больших } x \text{ удовлетворяет нера-$$

венству $|\tau_1(x)| \leq \frac{M}{x^\varepsilon}$, ε, M – положительные константы, $\tau_1(x)$ – удовлетворяет усло-

вию Гельдера на любом отрезке $[1, N]$, $N > 1$, $\varphi(y) \in C(\bar{J}_0)$, $y^{\frac{3m+2\beta_0}{4}} \varphi(y) \in L(0, \infty)$,

$\varphi(y)$ удовлетворяет условию Гельдера на любом отрезке $[0, N]$, $N > 0$, $\varphi(\infty) = 0$,

$\varphi(0) = 0$, $\theta_0(x_0)$ и $\theta_1(p(x_0))$ – точки пересечения характеристик OC и BC

соответственно с характеристиками, исходящими из точек

$$(x_0, 0) \text{ и } (p(x_0), 0), \quad x_0 \in (0, c):$$

$$\theta_0(x_0) = \left(\frac{x_0}{2}, -\left(\frac{m+2}{4} x_0 \right)^{\frac{2}{m+2}} \right),$$

$$\theta_1(p(x_0)) = \left(\frac{p(x_0)+1}{2}, -\left(\frac{(m+2)(1-p(x_0))}{4} \right)^{\frac{2}{m+2}} \right).$$

Теорема 1. Пусть выполнены условия $\varphi(y) \equiv 0$, $\psi(x) \equiv 0$, $f(x) \equiv 0$, $\tau_1(x) \equiv 0$, $0 < \rho < 1$, $\mu \geq 0$. Тогда задача В имеет лишь тривиальное решение.

Теорема 2. Пусть выполнены условия $p(x) = 1 - kx$, $0 < \rho < 1$, $0 \leq \mu < 1$. Тогда решение задачи B существует.

Литература

1. Смирнов М.М. Уравнения смешанного типа. Высшая школа, Москва, 1985. 304с.

О НЕКОТОРЫХ ОБРАТНЫХ ЗАДАЧАХ ДЛЯ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ БЛЭКА-ШОУЛЗА

Орлова Д. С., Пятков С. Г.
Югорский государственный университет
Ханты-Мансийск, Россия

Рассматривается обратная задача об определении численном решении коэффициента модели Блэка-Шоулза. Условия первой начально-краевой задачи дополняются условием переопределения, которое может быть рассмотрено как условие частичного финального переопределения. При выполнении некоторых условий на данные задачи, исследуются вопросы существования и единственности решения данной обратной задачи.

We consider the inverse problem of determining a numeric solution of volatility coefficient in the Black-Scholes model. The condition of overdetermination, which might be considered as the condition of partial final overdetermination, is added to the conditions of the initial boundary value problem. We consider the question of existence and uniqueness of this inverse problem solution.

Для любой цены акций $s \in (0, \infty)$ и времени $t \in (0, T)$, цена опциона, истекающего в момент времени T , удовлетворяет дифференциальному уравнению Блэка-Шоулза [1-2]

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{2} s^2 \sigma(s)^2 \frac{\partial^2 u}{\partial s^2} + s \mu \frac{\partial u}{\partial s} - ru = 0 \quad (s > 0), \quad (1)$$

где σ – коэффициент волатильности, μ и r – нейтральный к риску дрейф и безрисковая процентная ставка, соответственно. Обратная задача об определении решения u и коэффициента $\sigma(s)$ по некоторой дополнительной информации сводится вначале к обратной задаче для двойственного уравнения Блэка-Шоулза, и затем после некоторых замен к задаче

$$Lu = \frac{\partial u}{\partial t} - a(x, t) \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + (a(x, t) + \mu) \frac{\partial u}{\partial x} + \bar{\mu} u = 0, \quad \bar{\mu} = r - \mu, \quad a(x, t) = \frac{\sigma^2(s^* e^{x, T-t})}{2}, \quad x \in \mathbb{R}, \quad (2)$$

$$u|_{t=0} = u_0(x), \quad (3)$$

$$u(T, x) = u_T(x), \quad x \in G_0 = (c, d). \quad (4)$$

В качестве функции u_0 в [2] взята функция

$$u_0 = s^*(1 - e^x)^+ = \max(1 - e^x, 0). \quad (5)$$

Определим оператор $R: u \rightarrow v$, сопоставляющий функции u , непрерывной на промежутке $[c, d]$, и решение задачи Дирихле $A_1 v = 0$. $v|_{\partial G_0} = u|_{\partial G_0}$. Для $A_1 = \partial_{xx}$ имеем $v = R(u) = \frac{(x-c)}{(d-c)} u(d) + \frac{(d-x)}{(d-c)} u(c)$.

Положим $\beta^0 = \min\left(c - \frac{1}{2}, -\frac{1}{2}\right)$, $\alpha^0 = \min(c - 1, -1)$ и построим неотрицательную функцию $\psi_0 \in C^\infty \mathbb{R}$, $\psi_0 = \begin{cases} 1, & x \leq \alpha^0 \\ 0, & x \geq \beta^0 \end{cases}$. Определим функцию $\varphi_0 = s^*(e^{-\bar{\mu}t} - e^{x-(\bar{\mu}+\mu)t})$. Пусть $Q_R = (0, T) \times (-R, R)$, $R > 0$.

После некоторых замен переформулируем задачу в виде: найти функцию $a(x)|_{G_0}$ и решение уравнения (2), удовлетворяющее уравнению (3), и условию переопределения

$$A_1(a(x)l_0u_T - l_1u_T) = A_1(a(x)l_0u(x, T) - l_1u(x, T)), x \in G_0, \quad (6)$$

где $A_1v = a_0(x)v_{xx} + a_1v_x + a_2v$ ($a_i \in C^{2-i}([c, d])$, $i = 0, 1, 2$), причем задача Дирихле $A_1v = f \in L_2(G_0)$, $v|_{\partial G_0} = 0$ имеет единственное решение.

Мы используем уравнение (7) для определения функции $a(x)|_{G_0}$ методом построения последовательных приближений

$$a(x) = R_0(x) + S_0(a) = S(a) \quad (7)$$

$$R_0(x) = \frac{R(a(x)l(u_T) - \mu u_{Tx} - \bar{\mu}u_T) + \mu u_{Tx} + \bar{\mu}u_T}{l(u_T)}, S_0(a) = \frac{u_t(x, T) - R(u_t(x, T))}{l(u_T)}, \quad (8)$$

где u есть решение задачи (2), (3) и $x \in (c, d)$. Соответствующее k -е приближение находится по правилу

$$a^k(x) = R_0(x) + S_0(a^{k-1}(x)) \quad (9)$$

Следующая теорема показывает, что решение $a(x)|_{G_0}$ может быть найдено подобным образом.

Теорема. Пусть выполнены условия $\delta_i > 0$ ($i = 0, 1$), $R_0 \geq 0 \forall x \in G_0$, $a(x)|_{\mathbb{R} \setminus G_0} \in C(\overline{\mathbb{R} \setminus G_0})$, $m_0 \leq a(x) \leq M_0 \forall x \in \mathbb{R} \setminus G_0$ и $2(1 + r_0)s^* \sqrt{5 \left(\alpha_0 + \frac{2\mu^2}{m} \alpha_1 \right)} \beta_0 e^{d/2} \leq \delta_0 \delta_1 T$, где $\delta_0 = \inf_{G_0} |l_0 u_T(x)|$, $\delta_1 = \inf_{G_0} |R_0(x)|$. Тогда существует решение задачи (2), (3), (6) такое, что функция u обладает свойствами:

$u \in L_\infty(Q) \cap W_2^{1,2}(Q_R)$ для всех $R > 0$; $u = \psi_0 \varphi_0(x) + v(x, t)$, где v есть решение задачи $v_t - Av = (2a\psi_{0x}\varphi_x + a\psi_{0xx}\varphi - \mu\psi_{0x}\beta) = f_0(x, t)$; $v(0, t) = (1 - \psi_0)u_0(x) = v_0(x)$ такое, что $v, tv_t \in W_2^{1,2}(Q)$, $ve^{\gamma(1+x^2)^{\frac{1}{2}}}, tv_te^{\gamma(1+x^2)^{\frac{1}{2}}} \in W_2^{1,2}(Q) \forall \gamma > 0$. При дополнительных условиях также соблюдается единственность решения.

Результат работы алгоритма при $c = -1, d = 1, \mu = 0.1, r = -0.7, \varepsilon = 0.001, u_T = \sin(x) + 4 \cos(x + 0.15)$ и $a(x) = 3.8$ при $x \in [-R, c]$, $a(x) = 4$ при $x \in [d, R]$ представлен на рисунке 1.

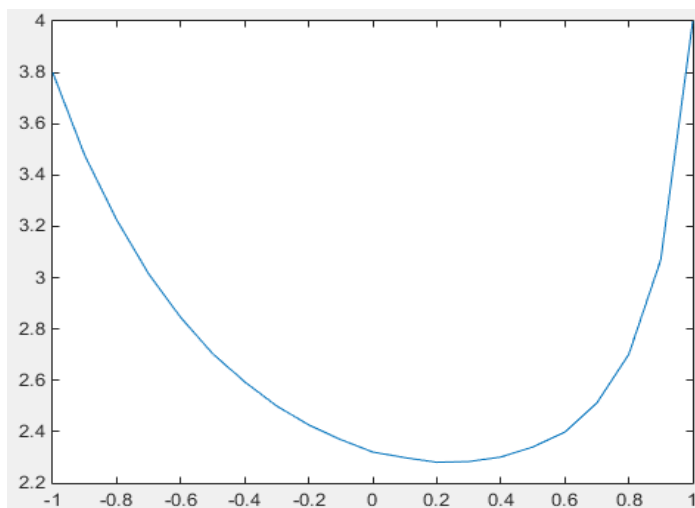


Рис. 1 График $a(x)$ при $u_T = \sin(x) + 4 \cos(x + 0.15)$

Литература

1. Black F. and Scholes M. The pricing of options and corporate liabilities // J. Political v. 81. 1973. p. 637-679.
2. Isakov V. The inverse problem of option pricing. Recent Developments in Theory and Numerics. International Conference on Inverse problems. City University of Hong Kong, 2002, pp. 47-55.

ОБ ОБРАТНЫХ ЗАДАЧАХ ОБ ОПРЕДЕЛЕНИИ ФУНКЦИИ ИСТОЧНИКА С ТОЧЕЧНЫМ ПЕРЕОПРЕДЕЛЕНИЕМ

Пятков С. Г.

Югорский государственный университет
Ханты-Мансийск, Россия

Мы рассматриваем вопрос о разрешимости обратной задачи об определении точечных источников в уравнении конвекции-диффузии по точечным данным переопределения. Определению подлежат решение уравнения, местоположение источников и их интенсивности. Найдены условия определяемости источников и единственности решений. Описаны качественные свойства решений.

We examine the question on solvability of the inverse problems of recovering point sources in a convection-diffusion equation with the use of the pointwise overdetermination. The unknowns are a solution to the equation, location of sources, and their intensities. The conditions allowing to determine sources are found as well as uniqueness conditions of their recovering. Some qualitative properties of solutions are described.

Мы рассматриваем обратные задачи с точечным переопределением для параболического уравнения вида

$$Lu = u_t + A(t, x, D)u = \sum_{i=1}^m \delta(x - x_i)q_i(t) + f_0(x, t), (t, x) \in Q = (0, T) \times G, G \subset \mathbb{R}^n, \quad (1)$$

где $A(t, x, D)u = -\sum_{i,j=1}^n a_{ij}(x)u_{x_j x_i} + \sum_{i=1}^n a_i(x)u_{x_i} + a_0(x)u$, G — область с границей $\Gamma \in C^2$ или $G = \mathbb{R}^n$. Уравнение (1) дополняется начальными и граничными условиями

$$u|_{t=0} = u_0, Bu|_S = g, S = (0, T) \times \Gamma, \quad (2)$$

где $Bu = \sum_{i=1}^n \gamma_i(x)u_{x_i} + \gamma_0(t, x)u$. Условия переопределения записываются в виде:

$$u(x_i, t) = \psi_i(t), i = 1, 2, \dots, r. \quad (3)$$

Задача состоит в определении неизвестных функций $q_i(t)$, точек x_i и решения u уравнения (1), удовлетворяющего условиям (2), (3).

Проблемы подобного вида возникают при описании процессов тепломассопереноса, диффузионных процессов, процессов фильтрации и во многих других областях. Простейшие приложения возникают в экологии, при определении источников загрязнения и их интенсивностей. Обратным задачам такого вида посвящено очень большое количество работ, однако, основные результаты связаны с методами численного решения подобных задач, причем многие из них далеко не всегда обоснованы. Задачи (1)–(3) некорректны по Адамару. Однако, кроме неразрешимости задачи в классах конечной гладкости, как например, в задаче Коши для уравнения Лапласа, имеется еще и некорректность другого вида: можно строить примеры, когда имеет место несуществование решений или их неединственность, причем последнее встречается очень часто. Большинство работ, посвященных численному решению этих задач, не учитывает этих особенностей задачи (1)–(3). Поэтому вопрос об условиях единственности решений подобных задач на наш взгляд представляется актуальным. Отметим, что численные методы очень часто основаны на сведении задачи к задаче оптимального управления и минимизации соответствующего квадратичного функционала.

Мы приведем условие единственности решений задачи (1)–(3) и вопрос о количестве условий вида (3) необходимых для определения решения, а также некоторые качественные свойства решений. Результаты опираются на асимптотические представления решений эллиптических задач с комплексным параметром, приведенные в работе [1].

Литература

1. Pyatkov S. G., Neustroeva L.V. On some asymptotic representations of solutions to elliptic equations and their applications // Complex Variables and Elliptic Equations, 2020. Published online: 14 Aug 2020. <https://doi.org/10.1080/17476933.2020.1801656>

ДВУХФАЗНАЯ ФИЛЬТРАЦИЯ В ТОНКОМ ПОРОУПРУГОМ СНЕЖНОМ СЛОЕ

Токарева М. А., Папин А. А., Береговых А. А.
Алтайский государственный университет
Барнаул, Россия

Динамика снежно-ледового покрова рассматривается в рамках теории пороупругости. Снежно-ледовый покров представляет собой трехфазную среду, состоящую из воды, воздуха и льда. Как правило, в задачах с фазовыми переходами твердый пористый каркас считается неподвижным, что позволяет исключить фазовые переходы. В данной постановке учтена деформация ледового скелета, который имеет собственную скорость.

The dynamics of snow and ice cover is considered within the framework of the theory of poroelasticity. Snow and ice cover is a three-phase medium consisting of water, air and snow. As a rule, in problems with phase transitions, a solid porous framework is considered stationary, which makes it possible to exclude phase transitions. This formulation takes into account the deformation of the ice skeleton, which has its own speed.

В работе рассматривается математическая модель движения жидкостей в тонком пороупругом слое, которая описывает движение воды и воздуха в тающем снеге [1]–[4]. Математическая модель включает в себя законы сохранения массы для каждой фазы с учётом фазовых переходов, законы сохранения импульса в виде закона Дарси для жидких фаз, реологическое соотношение для пористости, учитывающее вязкоупругие свойства скелета, уравнение баланса для системы в целом, а также уравнение для температуры. В модели также учтен капиллярный скачок. В работе [3] рассматривается однофазная фильтрация в тонком пороупругом слое и получено решение в квадратурах. В данной работе рассматривается математическая модель двухфазной фильтрации в тонком вязкоупругом деформируемом слое:

$$\frac{\partial \phi \rho_w^0 s_w}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_w^0 \phi s_w \vec{u}_w) = I_{iw} + I_{aw},$$

$$\frac{\partial \phi \rho_a^0 s_a}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_a^0 \phi s_a \vec{u}_a) = I_{wa} + I_{ia},$$
(1)

$$s_j \phi (\vec{u}_j - \vec{u}_i) = -\frac{k_j(\phi)}{\mu_j(\theta)} (\nabla p_j - \rho_j^0 \vec{g}), \quad j = w, a,$$
(2)

$$p_a - p_w = p_c(x, s), \quad s = \frac{s_w - s_w^0}{1 - s_w^0 - s_a^0},$$
(3)

$$0 \leq s \leq 1,$$

$$p_c(x, s) = \bar{p}_c(x) j(s),$$
(4)

$$\frac{\partial (1 - \phi) \rho_i^0}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_i^0 (1 - \phi) \vec{u}_i) = I_{wi} + I_{ai},$$
(5)

$$\nabla \cdot \vec{u}_i = -\frac{1}{\xi(\phi, \theta)} p_e - \beta_t(\phi, \theta) \left(\frac{\partial p_e}{\partial t} + \vec{u}_i \cdot \nabla p_e \right),$$
(6)

$$\rho_{tot} \vec{g} + \text{div} \left((1 - \phi) \eta(\theta) \left(\frac{\partial \vec{u}_i}{\partial \vec{x}} + \left(\frac{\partial \vec{u}_i}{\partial \vec{x}} \right)^* \right) \right) - \nabla p_{tot} = 0,$$
(7)

$$(\rho_a^0 c_a s_a \phi + s_w \rho_w^0 c_w \phi + \rho_i^0 c_i (1 - \phi)) \frac{\partial \theta}{\partial t} + (\rho_a^0 c_a s_a \phi \vec{u}_a +$$

$$+ s_w \rho_w^0 c_w \phi \vec{u}_w + \rho_i^0 c_i (1 - \phi) \vec{u}_i) \nabla \theta = \text{div}(\lambda_{tot}(\phi) \nabla \theta) - L_i I_{ai} - \nu I_{wi},$$
(8)

$$p_{tot} = \phi (s_w p_w + s_a p_a) + (1 - \phi) p_i^0,$$

$$p_e = p_{tot} - (s_w p_w + s_a p_a), \quad \rho_{tot} = \phi (s_w \rho_w^0 + s_a \rho_a^0) + (1 - \phi) \rho_i^0.$$
(9)

Здесь ϕ – пористость, $\vec{u}_j, s_j$ – скорости и насыщенности жидких фаз (доля пор, занятых j -й фазой (w – вода, a – воздух); $\vec{u}_i$ – скорость твердого скелета (i – лед), I_{jl} – интенсивность фазового перехода j -ой фазы в l -ую, $k_j(\phi)$ – коэффициент фильтрации, $\mu_j(\theta)$ – коэффициенты динамической вязкости, p_j – давления фаз смеси, $\vec{g}$ – вектор ускорения силы тяжести; $\bar{p}_c(x)$ – заданная функция точки $\vec{x} = (x_1, x_2, x_3)$, $j(s)$ – функция Леверетта ($\frac{dj(s)}{ds} \leq 0$, $j(0) = \infty$, $j(1) = 0$); ρ_i^0 – истинная плотность твердой фазы, p_e – эффективное давление, p_{tot} – общее давление, $\rho_{tot} = (1 - \phi)\rho_3^0 + \phi(s_1\rho_1^0 + s_2\rho_2^0)$ – общая плотность; $\xi(\phi, \theta)$ и $\beta_t(\phi, \theta)$ – коэффициенты объемной вязкости и объемной сжимаемости льда, есть заданные функции, c_j – теплоемкости фаз, L_i – удельная теплоемкость сублимации льда, ν – удельная теплоемкость плавления льда, λ_{tot} – теплопроводность среды в целом. Система (1)–(9) записана в эйлеровых координатах $\vec{x} \in R^3$, $t \in [0, T]$. Истинные плотности ρ_j^0 принимаются постоянными. Поскольку $s_w = 1 - s_a$, то неизвестными являются 15 скалярных величин: $s_w, \phi, p_w, p_a, p_i, \vec{u}_w, \vec{u}_a, \vec{u}_i, \theta$. Для их определения служат также 15 скалярных уравнений: два уравнения неразрывности (1), шесть уравнений закона Дарси (2), уравнение для капиллярного скачка (3), уравнение неразрывности твердой фазы (5), реологическое соотношение (6), три уравнения равновесия (7), уравнение для температуры (8). Движение рассматривается в плоском слое в системе координат (x, z) . В процессе обезразмеривания возникает малый параметр, после предельно перехода по которому в случае медленных течений получены некоторые точные решения.

Работа выполнена при поддержке гранта президента МК-204.2020.1 "Начально-краевые задачи для уравнений движения жидкостей в пороупругих средах и их приложения в динамике снежно-ледового покрова".

Литература

1. Папин А. А., Подладчиков Ю. Ю. Изотермическое движение двух несмешивающихся жидкостей в пороупругой среде, Известия Алтайского государственного университета, 1-2(85) (2015), 131-140.
2. Kuchment L. S., Romanov P., Gelfan A. N., Demidov V. N. Use of satellite-derived data for characterization of snow cover and simulation of snowmelt runoff through a distributed physically based model of runoff generation, Hydrol. Earth Syst. Sci., 14(2010), 339-350.
3. Tokareva M. A., Papin A. A. Mathematical model of fluids motion in poroelastic snow-ice cover, Journal of Siberian Federal University. Mathematics and Physics 2021, 14(1), 1-10.
4. Бондарев Э.А., Красовицкий Б.А. Температурный режим нефтяных и газовых скважин – Новосибирск: Наука, 1974.

КРАЕВАЯ ЗАДАЧА С НОРМАЛЬНЫМИ ПРОИЗВОДНЫМИ ДЛЯ ЭЛЛИПТИЧЕСКОГО УРАВНЕНИЯ НА ПЛОСКОСТИ

Солдатов А. П.

Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» РАН
Москва, Россия

Для эллиптического уравнения четного порядка в многосвязной области на плоскости рассматривается обобщенная задача Неймана, которая определяется заданием на ее границе соответствующего числа нормальных производных различных порядков не выше порядка этого уравнения. Установлен критерий фредгольмовости этой задачи и приведена формула ее индекса.

For elliptic equation of 2l order in multiply connected domain on the plane the generalized Neumann problem is considered. The necessary and sufficient condition under which the problem is correct and index formula are given.

Обобщенная задача Неймана для эллиптического уравнения четного $2l$ -го порядка определяется заданием на границе области, ограниченной достаточно гладким контуром, l нормальных производных различных порядков не выше $2l$. Для полигармонического уравнения эта задача была изучена А. В. Бицадзе [1]. Другой вариант задачи Неймана, основанный на вариационном принципе, был ранее предложен А. А. Дезиным [2]. В работе [3] для эллиптического уравнения с постоянными (и только старшими) вещественными коэффициентами была рассмотрена общая задача. Случай эллиптического уравнения с младшими коэффициентами был достаточно подробно исследован в [4-6]. Все рассмотрения велись в односвязной области.

В докладе обсуждается случай многосвязной области. Показано, что в этом случае критерий фредгольмовости сохраняется без изменений, однако формула индекса зависит также и от порядка связности области.

Литература

1. Бицадзе А. В. О некоторых свойствах полигармонических функций // Дифференц. уравнения, 1988. Т.24, №5. С.825-831.
2. Дезин А. А. Вторая краевая задача для полигармонического уравнения в пространстве W_2^m // Доклады АН СССР, 1954. Т.96, №5. С.901-903.
3. Малахова Н.А., Солдатов А. П. Об одной краевой задаче для эллиптического уравнения высокого порядка // Дифференц. уравнения, 2008. Т.4, №8. С.1077-1083.
4. Кошанов Б., Солдатов А. П. Краевая задача с нормальными производными для эллиптического уравнения высокого порядка на плоскости // Дифференц. уравнения, 2016. Т.52, №12. С.1666-1681.
5. Koshanov B.D., Soldatov A.P. About the generalized Dirichlet-Neumann problem for an elliptic equation of high order // AIP Conference Proceedings, 1997. 020013 (2018).
6. Солдатов А. П. О фредгольмовости и индексе обобщенной задачи Неймана // Дифференц. уравнения, 2020. Т.56, №2. С.217-225.

О НЕКОТОРЫХ АСИМПТОТИЧЕСКИХ ПРЕДСТАВЛЕНИЯХ И ИХ ПРИЛОЖЕНИЯХ

Пятков С. Г., Неустроева Л. В.
Югорский государственный университет
Ханты-Мансийск, Россия

В работе рассматривается вопрос об асимптотическом представлении решений эллиптических задач с комплексным параметром, входящим в уравнение для некоторого класса областей в двухмерном и трехмерном случаях. Результаты могут быть использованы при исследовании некоторых задач об определении точечных источников в задачах тепломассопереноса и фильтрации, в частности, в экологических задачах определения источников загрязнения в речном или воздушном бассейне (см. [1,2]).

Рассматривается следующая эллиптическая задача, зависящая от комплексного параметра

$$Lu = -\Delta u + \sum_{i=1}^n a_i u_{x_i} + a_0 u + \lambda u = \delta(x - x_0), \quad x \in G \subset \mathbb{R}^n \quad (1)$$

$$Bu|_{\Gamma} = 0, \quad \Gamma = \partial G, \quad n = 2, 3, \quad (2)$$

где $Bu = u$ или $Bu = \frac{\partial u}{\partial \nu} + \sigma(x)u$, ν – единичная внешняя нормаль к Γ и δ – дельта-функция Дирака. Предполагается, что $\lambda \in \mathbb{C}$ и $|\arg \lambda| \leq \pi - \delta_0$, $\delta_0 \in (0, \pi)$.

Рассмотрим уравнение (1) и несколько случаев $G = \mathbb{R}^n$, $G = \mathbb{R}_+^n = \{x \in \mathbb{R}^n: x_n > 0\}$ и G – область с компактной границей Γ класса C^2 .

Определим функцию $(\vec{a} = (a_1, a_2, \dots, a_n))$

$$\psi = \frac{1}{2} \int_0^1 (\vec{a}(x_0 + \tau(x - x_0))) d\tau \quad (3)$$

Предположим, что

$$\alpha_i \in W_\infty^2(G) (i = 1, \dots, n), \quad \nabla \psi, \Delta \psi, a_0 \in L_\infty(G). \quad (4)$$

Теорема. Пусть $G = \mathbb{R}^n$ ($n = 2, 3$) и выполняется условие (4). Тогда найдется $\lambda_0 \geq 0$ такое, что при всех $|\lambda| > \lambda_0$, $|\arg \lambda| \leq \pi - \delta_0$, ($\delta_0 \in (0, \pi)$) существует единственное решение $u_n(x)$ уравнения (1) убывающее на ∞ и такое, что $e^{-\psi} u \in W_p^1(G) \cap W_q^2(G_\varepsilon)$ при всех $p \in (1, n/(n-1))$, $q < \infty$ и $\varepsilon > 0$ ($G_\varepsilon = \{x \in G: |x - x_0| > \varepsilon\}$) и решение допускает в любой области вида $0 < \varepsilon \leq |x - x_0| \leq R < \infty$ представление

$$u_2(x) = \frac{1}{2\sqrt{2\pi}|x-x_0|\lambda^{\frac{1}{4}}} e^{\psi - \sqrt{\lambda}|x-x_0|} (1 + O\left(\frac{1}{\sqrt{|\lambda|}}\right)), \quad (5)$$

$$u_{2x_i}(x) = \frac{-\lambda^{1/4} e^{\psi - \sqrt{\lambda}|x-x_0|}}{2\sqrt{2\pi}|x-x_0|} \left(\frac{x_i - x_{0i}}{|x-x_0|} + O\left(\frac{1}{\sqrt{|\lambda|}}\right) \right), \quad (6)$$

$$u_3(x) = \frac{1}{4\pi|x-x_0|} e^{\psi - \sqrt{\lambda}|x-x_0|} (1 + O\left(\frac{1}{\sqrt{|\lambda|}}\right)), \quad (7)$$

$$u_{3x_i}(x) = \frac{-\sqrt{\lambda} e^{\psi - \sqrt{\lambda}|x-x_0|}}{4\pi|x-x_0|} \left(\frac{x_i - x_{0i}}{|x-x_0|} + O\left(\frac{1}{\sqrt{|\lambda|}}\right) \right). \quad (8)$$

Аналогичные результаты имеют место и в случае $G \neq \mathbb{R}^n$. В этом случае рассматривается вещественный параметр λ и представления (5), (7) справедливы на компактах определенного вида, лежащих в области G не содержащих точку x_0 .

Литература

1. Пятков С. Г., Сафонов Е. И. О некоторых классах обратных задач об определении функций источников // Математические труды. 2016, том 19, №1, 178-198.
2. Ling L. and Takeuchi T/ Point sources identification problems for heat equations // Commun.Comput. Phys. 2009. V.5, N 5. P.897-913.

О СУЩЕСТВОВАНИИ И ЕДИНСТВЕННОСТИ РЕШЕНИЯ ОДНОГО ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО УРАВНЕНИЯ СМЕШАННОГО ТИПА

Дзарахохов А. В.¹, Шишкина Э. Л.²

¹ Горский государственный аграрный университет
Владикавказ, Россия

² Воронежский государственный университет
Воронеж, Россия

В докладе исследуется аналог задачи Трикоми для уравнения смешанного типа третьего порядка с кратными характеристиками. Показано существование и единственность решения краевой задачи для такого уравнения.

В докладе рассматривается дифференциальное уравнение смешанного типа вида

$$0 = \begin{cases} u_{xxx} - u_y + bu_x, y > 0, b \in R, \\ u_{yy} - (-y)^m u_{xx} + \frac{p}{x} u_y, 0 \leq p < 1, m > 0, y < 0 \end{cases} \quad (1)$$

в конечной односвязной области $\Omega = \Omega_1 \cup \Omega_2$, где Ω_1 – область, ограниченная отрезками AA_0 , BB_0 , A_0B_0 прямых $x=0$, $x=1$, $y=h$, соответственно, расположенная в верхней полуплоскости ($y>0$), а область Ω_2 ограничена характеристиками

$$AC: x - \frac{2}{m+2} (-y)^{\frac{m+2}{2}} = 0, BC: x + \frac{2}{m+2} (-y)^{\frac{m+2}{2}} = 1$$

уравнения (1) при $y<0$ и отрезком AB (см. рис. 1).

Теория краевых задач для уравнений смешанного типа, таких как (1) за сравнительно короткий период стала одним из актуальных вопросов современного математического анализа, в частности, уравнений с частными производными: безмоментная

теория оболочек со знакопеременной кривизной, задачи околосвуковой и сверхзвуковой газовой механики, теория бесконечно малых изгибов поверхностей, магнито-гидродинамические течения с периодом через критические скорости [1].

Решение $u=u(x,y)$ уравнения (1) в области Ω назовем регулярным, если $u \in C(\bar{\Omega}) \cap C^1(\Omega) \cap C^2(\Omega_2)$, $u_{xxx}, u_y \in C(\Omega_1)$ и функция

$$v(x) = \lim_{y \rightarrow 0+} u_y(x, y) = \lim_{y \rightarrow 0-} (-y)^p u_y(x, y)$$

при $x \rightarrow 0$ и при $x \rightarrow 1$ может стремиться к бесконечности только порядка меньше 1.

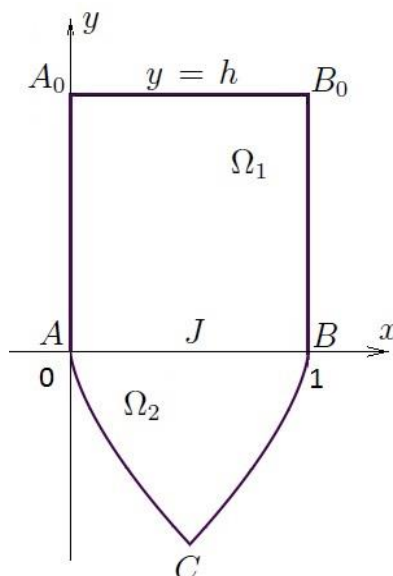


Рис. 1. Область, в которой ставится задача для уравнения (1)

Рассмотрим задачу.

Задача 1. Найти функцию $u=u(x,y)$, такую, что

1. $u(x,y)$ есть регулярное решение уравнения (1) в Ω ,
2. на линии $y=0$ справедливы условия склеивания

$$\lim_{y \rightarrow 0+} u_y(x, y) = \lim_{y \rightarrow 0-} (-y)^p u_y(x, y)$$

для всех $x \in [0,1]$,

3. $u(x,y)$ удовлетворяет граничным условиям

$$u(0,y)=\varphi_1(y), u_x(0,y)=\varphi_2(y), u(1,y)=\varphi_3(y), 0 \leq y \leq h,$$

$$u(x,y)|_{AC} = \psi_1(x), 0 \leq x \leq 1/2, u(x,y)|_{CB} = \psi_2(x), 1/2 \leq x \leq 1, y < 0,$$

где $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$ заданные непрерывные на $[0,1]$ функции, ψ_1 – заданная дважды непрерывно дифференцируемая на $[0,1/2]$ функция, ψ_2 – заданная дважды непрерывно дифференцируемая на $[1/2,1]$ функция. При этом выполнены условия согласования $\varphi_1(0) = \psi_1(0)$, $\varphi_2(0) = \psi_1'(0)$, $\varphi_3(0) = \psi_2(1)$, $\psi_1(1/2) = \psi_2(1/2)$.

В докладе будут даны условия, при которых решение задачи 1 существует и единственно.

Литература

1. Смирнов М.М. Уравнения смешанного типа. – М.: Наука, 1968. – 511 с.

О НЕКОТОРОЙ КРАЕВОЙ ЗАДАЧЕ С УСЛОВИЯМИ СОПРЯЖЕНИЯ ДЛЯ КВАЗИПАРАБОЛИЧЕСКИХ УРАВНЕНИЙ ТРЕТЬЕГО ПОРЯДКА С РАЗРЫВНЫМ ЗНАКОПЕРЕМЕННЫМ КОЭФФИЦИЕНТОМ

Шадрина Н. Н.

Бурятский Государственный университет имени Доржи Банзарова, Улан-Удэ, Россия

В работе проведено исследование разрешимости краевых задач для дифференциальных уравнений третьего порядка с разрывным знакопеременным коэффициентом при старшей производной по временной переменной. На линии разрыва действуют условия сопряжения. Доказаны теоремы существования и единственности регулярных (имеющих все обобщенные по С.Л. Соболеву производные, входящие в уравнение) решений.

In this paper, we study the solvability of boundary value problems for third-order differential equations with a discontinuous alternating coefficient with the highest derivative in the time variable. On the line of the permeability gap, the coupling conditions apply. The existence and uniqueness theorems of regular solutions (having all Sobolev-generalized derivatives included in the equation) are proved.

Рассматривается краевая задача с условиями сопряжения для дифференциального уравнения третьего порядка в цилиндрах $Q_1 = \Omega \times (-T, 0)$ и $Q_2 = \Omega \times (0, T)$, где Ω – ограниченная область с гладкой (бесконечно-дифференцируемой) границей Γ . Данная область принадлежит пространству R^n , T есть заданное положительное число. Заданы также функции $\varphi(t)$ и $f(x, t)$, определенные при $t \in [-T, T]$, $x \in \Omega$.

Пусть L – дифференциальный оператор, действие которого на заданной функции $v(x, t)$ определяется равенством

$$Lv = \varphi(t) D^3 v + \Delta v.$$

В работе определяются условия, при которых задача нахождения функции $u(x, t)$, представляющей собой в цилиндрах Q_1 и Q_2 решение уравнения

$$Lu = f(x, t)$$

является корректной.

Также для функции $u(x, t)$ выполняются условия сопряжения

$$\begin{aligned} \alpha_1 u(x, -0) + \alpha_2 u(x, +0) + \alpha_3 u_t(x, -0) + \alpha_4 u_t(x, +0) + \\ + \alpha_5 u_{tt}(x, -0) + \alpha_6 u_{tt}(x, +0) = 0, x \in \Omega, \\ \beta_1 u(x, -0) + \beta_2 u(x, +0) + \beta_3 u_t(x, -0) + \beta_4 u_t(x, +0) + \\ + \beta_5 u_{tt}(x, -0) + \beta_6 u_{tt}(x, +0) = 0, x \in \Omega, \end{aligned}$$

где $\alpha = (\alpha_i)$, $\beta = (\beta_i)$, $i = 1, 6$ – заданные векторы с действительными координатами. На боковых границах цилиндров Q_1 и Q_2 и на основаниях $t = -T$ и $t = T$ граничные условия однородны:

$$\begin{aligned} u(x, t)|_{\Gamma \times (-T, 0)} = 0, u(x, t)|_{\Gamma \times (0, T)} = 0, \\ u(x, -T) = u(x, T) = 0. \end{aligned}$$

Вопрос о влиянии параметров на разрешимость некоторых задач сопряжения был рассмотрен автором для эллиптических уравнений в работе [1].

Литература

1. Шадрина, Н. Н. О влиянии параметров на разрешимость некоторых задач сопряжения для эллиптических уравнений / Н. Н. Шадрина // Сибирские электронные математические известия. – Новосибирск. – 2016. – Т. 13. – С. 411 – 425.

ПРОБЛЕМЫ ИДЕНТИФИКАЦИИ НЕИЗВЕСТНОГО ИСТОЧНИКА В УРАВНЕНИИ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ

Денисов А. М.

Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова
Москва, Россия

В трехмерном слое рассматривается уравнение теплопроводности с источником, представляющим сумму двух функций, каждая из которых является произведением функции, зависящей от трех пространственных переменных, умноженной на экспоненциально убывающую функцию времени. Две зависящие от пространственных переменных функции неизвестны. Требуется определить их по дополнительной информации о решении начально-краевой задачи для уравнения теплопроводности, являющейся функцией двух пространственных переменных и времени. Показано, что в общей постановке решение такой задачи идентификации источника не единственно. Указаны условия обеспечивающие единственность решения данной обратной задачи.

In a three-dimensional layer, we consider a heat equation with a source representing the sum of two functions, each of which is the product of a function that depends on three spatial variables, multiplied by an exponentially decreasing function of time. Two spatial variable-dependent functions are unknown. It is necessary to determine them by additional information about the solution of the initial boundary value problem for the heat equation, which is a function of two spatial variables and time. It is shown that in the general formulation, the solution of such a source identification problem is not unique. The conditions that ensure the uniqueness of the solution of this inverse problem are specified

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАДИАЦИОННО-КОНДУКТИВНОГО ТЕПЛООБМЕНА В ПЛОСКОМ СЛОЕ ЛЬДА ПРИ РАДИАЦИОННОМ НАГРЕВЕ

Саввинова Н. А.¹, Слепцов С. Д.², Гришин М. А.²

¹ Северо-Восточный федеральный университет им. М. К. Аммосова, Якутск, Россия

² Институт теплофизики СО РАН, Новосибирск, Россия

Методами численного моделирования проведены расчеты по радиационно-кондуктивному теплообмену при радиационном нагреве плоского слоя льда с последующим таянием. Лед представляет собой поглощающую и рассеивающую излучение среду. Учет анизотропного рассеяния проводился двумя методами: разложение индикатрисы рассеяния в ряд по полиномам Лежандра и транспортного приближения. Показано, что при учете анизотропного рассеяния предпочтителен метод транспортного приближения. Результаты удовлетворительно согласуются с экспериментом.

Calculations of radiation-conductive heat transfer during radiation heating of a plane ice layer with subsequent melting have been carried out using numerical methods. Ice is a absorbing and scattering medium. Anisotropic scattering was taken into account by two methods: expansion of the scattering indicatrix in a series in terms of the Legendre polynomials and the transport approximation. It is shown that the transport approximation method is preferable when taking into account anisotropic scattering. The numerical results are in satisfactory agreement with experimental data.

Естественный лед представляет собой полупрозрачный светорассеивающий материал. Свет рассеивается на пузырьках воздуха и иных газов, а также трещинами, включениями из водных растений, организмов, загрязнений и т. д. Комплексное исследование теплофизики льда связано с исследованием радиационно-кондуктивного теплообмена с учетом широкого спектра оптических свойств материала.

Математическое моделирование нагрева и последующего таяния рассеивающего излучение льда основано на использовании постановки задачи Стефана для полупрозрачных сред. В [1, 2] авторы показали применимость однофазной постановки задачи Стефана к таянию чистого льда под двумя видами источника излучения в климатической камере. Таяние с учетом рассеяния излучения при разных альбедах показано в работе [3].

Для решения задач с учетом анизотропного рассеяния излучения в слое льда можно использовать разложение индикатрисы рассеяния в ряд по полиномам Лежандра [5] или, например, наиболее простое транспортное приближение [6]. Первый метод удобен для численных расчетов и входит во многие программные комплексы. Второй метод проще, однако требует эмпирических данных.

Целью данной работы является дальнейшее развитие постановки работы [3] с учетом анизотропного рассеяния излучения. Учитываются селективность источника излучения, а также селективное объемное поглощение и рассеяние излучения. Результаты численного расчета сравниваются с экспериментальными данными, приведенными в [4].

Постановка задачи представляет собой исследование радиационно-кондуктивного теплообмена в плоском слое рассеивающего излучения льда толщиной L_0 , сопряженного с вертикально расположенной подложкой и находящегося в климатической камере с постоянной температурой 0°C . На правую сторону льда от лампы с температурой накаливания нити 3200 K падает постоянный поток излучения. Диапазон излучения данной лампы приходится большей частью на участок спектра до 1.2 мкм .

Решение задачи состоит из двух этапов. На первом этапе рассматривается радиационно-кондуктивный теплообмен в слое, продолжающийся до момента достижения правой границей льда температуры фазового перехода T_f . На втором этапе, с фиксированным значением T_f , рассматривается однофазная задача Стефана, в которой возникающая тонкая пленка воды стекает под влиянием сил тяготения, оказывая при этом дополнительную тепловую нагрузку в виде конвекции и излучения. Положение границ раздела фаз определяется из решения краевой задачи.

Результаты расчета таяния льда с использованием двух методов учета анизотропного рассеяния показали, что метод транспортного приближения позволяет лучше различить влияние анизотропного рассеяния на скорость таяния льда по сравнению с методом разложения в ряд по полиномам Лежандра. Сравнение численных результатов с экспериментом показывает удовлетворительное согласие.

Литература

1. Sleptsov S. D., Savvinova N. A. and Rubtsov N. A. Ice Melting with Allowance for Selective Absorption in the Medium // *Journal of Engineering Thermophysics*. – Vol. 28, No. 1. – 2019. – Pp. 114–122.
2. Слепцов С.Д., Саввинова Н.А. Таяние льда при облучении селективным источником теплового излучения // *Теплофизика и аэромеханика*. – Т. 26, № 5. – 2019. – С. 813–820.
3. Слепцов С.Д., Саввинова Н.А. Расчетное исследование нестационарного теплового состояния льда с учетом рассеяния излучения // *Теплофизика и аэромеханика*. – Т. 27, № 4. – 2020. – С. 647–654.
4. N. Seki, M. Sugawara, and S. Fukusaki. Radiative melting of ice layer adhering to a vertical surface // *Wärme- und Stoffübertragung*. – Vol. 12, Iss. 2. – 1979. – Pp. 137–144.
5. Рубцов Н.А., Тимофеев А. М., Саввинова Н.А. Комбинированный теплообмен в полупрозрачных средах. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2003. – 197 с.
6. Dombrovsky L.A. The use of transport approximation and diffusion-based models in radiative transfer calculations // *Computational Thermal Science*. – Vol. 4, no. 4. – 2012. – Pp. 297–315.

РАЗРАБОТКА И ПРИМЕНЕНИЕ ОБОБЩЕННЫХ МОДЕЛЕЙ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ОПРЕДЕЛЯЮЩИХ ХАРАКТЕРИСТИК КОМПОЗИТОВ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ ФАКТОРОВ ВНЕШНЕЙ СРЕДЫ, ХАРАКТЕРНЫХ ДЛЯ УСЛОВИЙ КРАЙНЕГО СЕВЕРА, АРКТИЧЕСКОЙ И СУБАРКТИЧЕСКОЙ ЗОНЫ

Гусев Е. Л.

Институт проблем нефти и газа СО РАН

Якутск, Россия

Северо-Восточный федеральный университет им. М. К. Аммосова

Якутск, Россия

Необходимость обеспечения длительной работоспособности композиционных материалов и конструкций из них обуславливает актуальность разработки эффективных методов как краткосрочного, так и долгосрочного формообразования, определяющих характеристик композитов в экстремальных условиях. В основу разработки обобщенных моделей долговечности полимерных композиционных материалов в экстремальных условиях положены основные положения современной молекулярно-кинетической теории. В соответствии со сформулированным принципом множественности моделей прогнозирования и введенным понятием оптимальных моделей прогнозирования оптимальной структуры и сложности в рамках вариационной постановки задача восстановления неопределенных параметров сформулирована как проблема поиска глобального минимума функционалов, оценивающих степень адекватности моделей, описывающих влияние внешней среды на композиты. Приведены результаты сравнительных вычислительных экспериментов.

Need of the motivation to long capacity to work composite materials and design of them raise urgency of the development of the efficient methods as short-term, so and fair-, and long-term forecasting defining features composites in extreme condition. In base of the development of the generalised models to longevity polymeric composite materials in extreme condition prescribed main positions modern molecular-kinetic theory. In accordance with worded by principle to multiplicity of the models of the forecasting and incorporated notion of the optimum models of the forecasting of the optimum structure and difficulties in variational production problem reconstruction vague parameter is worded as problem of searching for of the global minimum functional, valuing degree to adequacy to models, describing influence extreme factor external ambience on composite. The comparative computing experiments are considered.

Полимерные материалы (ПМ), полимерные композиционные материалы (ПКМ) благодаря разнообразию своих свойств получили самое широкое распространение во всех областях, в том числе, и при эксплуатации в экстремальных условиях [1-4]. При выборе материала для конкретного использования в промышленности, в строительстве, на транспорте из большого количества возможных вариантов подбирается такой состав, который обеспечит сочетание необходимых показателей при приемлемой стоимости. Важнейшим преимуществом материала становится его способность как можно дольше сохранять свою работоспособность, т. е. противостоять старению – совокупности физико-химических обратимых и необратимых превращений под воздействием агрессивных внешних факторов (температуры, влажности, солнечной радиации, механических напряжений и др.). Доминируют ПМ и ПКМ, способные без замены функционировать 203–0, а в необходимых случаях и более 50 лет. Необходимость обоснования длительной работоспособности ПМ и ПКМ повышает актуальность разработки эффективных методов как краткосрочного, так и средне-, и долгосрочного прогнозирования определяющих характеристик композитов в экстремальных условиях, характерных для Крайнего Севера, Арктической и Субарктической зоны. Боль-

шинство химических превращений инициируется внешними факторами – температурой, световой и проникающей радиацией; механические и электрические воздействия в большинстве случаев способствуют ускорению химических превращений. Химические превращения могут происходить как на межмолекулярном, так и на внутримолекулярном уровнях. На основе проведенных исследований была установлена связь между энергией активации протекающего при старении химического процесса и интенсивностью молекулярных движений в полимере. Это выражается в зависимости энергии активации от температуры и физического состояния полимера. Важность и актуальность разработки эффективных методов прогнозирования изменения свойств ПМ, ПКМ объясняется тем, что без данных о характере и скорости изменения механических, электрических, теплофизических свойств полимеров в условиях эксплуатации изделий невозможно обеспечить рациональный выбор материалов и повысить за счет этого надежность изделий.

В основу разработки обобщенных моделей долговечности ПМ, ПКМ в экстремальных условиях положены основные положения современной молекулярно-кинетической теории (МКТ). Согласно МКТ скорость химической реакции представляется уравнением Аррениуса вида $k = k_0 \exp(-E_a/RT)$. Фактор частоты k_0 характеризует частоту столкновений реагирующих молекул (число активных столкновений частиц в единице объема в реакционной смеси) и выражает ту долю частиц, у которых энергия равна или больше энергии активации. Энергия активации E_a представляет собой избыток энергии по отношению к средней энергии частиц при данной температуре, который необходим для того, чтобы реагирующие частицы могли вступить в химическую реакцию и определяется свойствами реагирующих частиц, их энергетическим состоянием. Уравнение Аррениуса в дифференциальной форме может быть представлено в виде: $d(\ln k)/dT = E_a/RT^2$. Из дифференциальной формы уравнения следует, что чем больше энергия активации, тем быстрее увеличивается константа скорости реакции с возрастанием температуры.

При построении обобщенных моделей долговечности в соответствии с основными положениями МКТ было принято, что воздействие каждого из экстремальных факторов F_j на композит активирует на микроуровне совокупность деструктивных элементарных процессов, протекающие химические реакции в которых могут быть описаны в виде суперпозиции уравнений Аррениуса. Каждое из составляющих суперпозицию уравнений Аррениуса описывает определенный вид химических реакций, с присущими ему параметрами – фактором частоты, характеризующим частоту столкновений реагирующих молекул (число активных столкновений частиц в единице объема ПКМ), и энергией активации, присущими для данной реакции.

Физические задачи восстановления параметров деструктивных химических реакций, инициированных действием экстремальных факторов внешней среды сформулированы в математической форме в рамках уточненных вариационных постановок обратных задач прогнозирования определяющих характеристик ПКМ. В соответствии со сформулированным принципом множественности моделей прогнозирования и введенным понятием оптимальных моделей прогнозирования оптимальной структуры и сложности в вариационной постановке [5–7], задача восстановления неопределенных параметров может быть сведена к нахождению глобального минимума функционала, оценивающего степень адекватности модели, описывающей воздействие экстремальных факторов внешней среды на композит. Разработаны комбинированные методы прогнозирования, которые могут быть применены для эффективного восстановления параметров моделей в усложненных задачах прогнозирования долговечности ПМ, ПКМ при воздействии экстремальных факторов внешней среды.

Литература

1. Реутов А. И. Прогнозирование климатической стойкости полимерных материалов, применяемых в строительстве // Вестник ТГАСУ, 2009, №2, с. 127-141.
2. Степанов М.Н., Зинин А. В. Прогнозирование характеристик сопротивления усталости материалов и элементов конструкций. М.: Инновационное машиностроение, 2007. 392 с.
3. Башкарев А. Я., Веттегрен В.И., Суслов М. А. Долговечность полимерных композитов, СППТУ, С-Птб, 2016. – 147 с.
4. Булманис В.Н., Старцев О.В. Прогнозирование изменения прочности полимерных волокнистых композитов в результате климатического воздействия. Препринт, – Якутск, 1988. – 32 с.
5. Gusev E.L. Using parallel procedures for the searching of the extremum for the decision of the inverse problems prediction of the defining characteristics of the composite materials// Material Physics and Mechanics , 2016, v.26, N 1 , p. 70-72.
6. Гусев Е.Л. , Бакулин В.Н. Вариационные постановки обратных задач прогнозирования остаточного ресурса композитов // Доклады Академии наук, 2018, т. 482, №3, с. 281-286 .
7. Гусев Е.Л. Методы решения обратных задач прогнозирования остаточного ресурса композитов в уточненных вариационных постановках на основе принципа множественности моделей прогнозирования//В сб. трудов Всероссийской конференции «Механические свойства современных конструкционных материалов», М., ИМЕТ, 2018, с. 53.

УЧЕТ ОШИБОК ИЗМЕРЕНИЙ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ ДОЛГОВРЕМЕННОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПРИ ПРИМЕНЕНИИ МОДЕЛЕЙ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ОПТИМАЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ И СЛОЖНОСТИ В ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ ВНЕШНЕЙ СРЕДЫ

Гусев Е. Л.^{1, 2}, Бакулин В. Н.

¹ Институт проблем нефти и газа СО РАН
Якутск, Россия

² Северо-Восточный федеральный университет им. М. К. Аммосова
Якутск, Россия

³ Институт прикладной механики РАН
Москва, Россия

В рамках уточненных вариационных постановок обратных задач прогнозирования определяющих характеристик композитов при воздействии экстремальных факторов внешней среды проведено исследование влияния погрешностей измерения остаточного ресурса на интервале ретроспекции на точность прогноза. Разработаны функциональные аналитические соотношения, позволяющие оценить влияние уровня погрешностей измерений остаточного ресурса на интервале ретроспекции на точность прогноза остаточного ресурса композитов.

Within the framework of the refined variational statements of inverse problems of predicting the determining characteristics of composites under the influence of extreme environmental factors, the influence of errors in measuring the residual resource in the retrospection interval on the accuracy of the forecast is studied. Functional analytical relations have been developed that allow us to evaluate the influence of the level of measurement errors of the residual resource in the retrospection interval on the accuracy of the forecast of the residual resource of composites.

Одной из важных проблем при разработке различных конструкций, машин и механизмов является проблема создания надежных методов количественной оценки работоспособности конструкций из полимерных и композиционных материалов [1-7]. В случае, когда полученные экспериментальные данные достаточно адекватно отображают структуру зависимости изменения остаточного ресурса полимерного композита, задача восстановления параметров моделей может быть сведена к решению следующей экстремальной задачи:

$$J(u^*) = \min_u J(u). \quad (1)$$

В этих обозначениях: $u = (u_1, u_2, \dots, u_n)$ – вектор параметров модели прогнозирования. Вектор параметров $u^* = (u_1^*, u_2^*, \dots, u_n^*)$, доставляющих минимум показателю эффективности $J(u)$ (1), определяет оптимальную прогнозируемую временную зависимость изменения остаточного ресурса полимерного композита. В случае, когда измерения остаточного ресурса на интервале ретроспекции произведены с определенными погрешностями, актуальность приобретает проблема исследования влияния на результаты прогноза вносимой погрешности измерения исходных данных.

Построены аналитические оценки, связывающие предельно-допустимую точность прогнозирования $\gamma_{\max}$ и максимально допустимую погрешность измерений $\epsilon_{\max}$ определяющего свойства с основными параметрами моделей, позволяющие эффективно управлять согласованием основных параметров моделей прогнозирования для наиболее оптимального достижения целей прогнозирования. Обозначим через $\tilde{R}_i, (i=1, \dots, m)$ значения определяющего свойства в моменты времени $t_1, t_2, \dots, t_m$, измеренные с некоторыми погрешностями Q_i : $\tilde{R}_i = R_i^* + Q_i, (i=1, \dots, m)$. При этом $|Q_i| \leq \epsilon_i$. Совокупность погрешностей $Q_1, Q_2, \dots, Q_m$ будем рассматривать как некоторую совокупность непрерывных случайных величин. В этом случае суммарная среднеквадратическая ошибка $\tilde{S}$ также будет являться случайной величиной, зависящей, кроме вектора параметров u , дополнительно от случайных факторов $Q_1, Q_2, \dots, Q_m$, связанных с погрешностями измерений:

$$\tilde{S} = S(u; Q) = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m [R_i(Q) - R(u_1, u_2, \dots, u_n; t_i)]^2 \Rightarrow \min_{u \in U}. \quad (2)$$

В этих обозначениях Q – вектор ошибок измерений: $Q = (Q_1, Q_2, \dots, Q_m)$; $R_i(Q) = \tilde{R}_i$ – измеренные значения определяющего параметра R в моменты времени $t_1, t_2, \dots, t_m$ с учетом погрешностей измерений $Q_1, Q_2, \dots, Q_m$. Обозначим через $\tilde{u}^* = u^*(Q)$ – вектор неопределенных параметров, доставляющий глобальный минимум суммарной среднеквадратической ошибке $\tilde{S}$ (2):

$$S(u^*(Q); Q) = \min_{u \in U} S(u; Q). \quad (3)$$

Для построения оценок сверху на допустимые величины погрешностей Q_i ($i=1, \dots, m$) измерения значений определяющего свойства R_i в моменты времени $t_1, t_2, \dots, t_m$ произведем разложение в ряд n -мерной вектор-функции $u^*(Q) = (u_1^*(Q), u_2^*(Q), \dots, u_n^*(Q))$ по степеням векторного параметра $Q = (Q_1, Q_2, \dots, Q_m)$, учитывая, что $u^*(0) = u^* = (u_1^*, u_2^*, \dots, u_n^*)$.

$$u_j^*(Q) = u_j^* + \sum_{s=1}^m \beta_{js} Q_s + o(\|Q\|), \quad j = 1, 2, \dots, n. \quad (4)$$

На основе конструктивного математического анализа необходимых и достаточных условий экстремума в уточненных вариационных постановках обратных задач прогнозирования с разложением основных соотношений задачи в ряды по степеням векторного параметра Q , описывающего распределение погрешностей измерений по моментам времени $t_1, t_2, \dots, t_m$ построены функциональные аналитические соотношения, которым удовлетворяют коэффициенты разложения параметров оптимальных моделей

прогнозирования оптимальной структуры β_{js} ($j=1,2,\dots,n$; $s=1,2,\dots,m$). Построенные функциональные аналитические соотношения позволяют определить коэффициенты разложений β_{js} ($j=1,2,\dots,n$; $s=1,2,\dots,m$) оптимальных параметров моделей прогнозирования оптимальной сложности (4). Знание коэффициентов β_{js} ($j=1,2,\dots,n$; $s=1,2,\dots,m$) позволяет проводить качественное исследование влияния малых погрешностей измерений остаточного ресурса Q_i , ($i=1,2,\dots,m$) на различных участках интервала ретроспекции на отклонение параметров оптимальных моделей прогнозирования от параметров моделей, определяющих реальную временную зависимость остаточного ресурса на интервале проспекции. В соответствии с этим разработанные функциональные аналитические соотношения позволяют оценивать влияние уровня погрешностей измерений остаточного ресурса, допущенных в различные моменты времени $t_1, t_2, \dots, t_m$ на результирующую точность прогноза на интервале проспекции.

Литература

1. Реутов А. И. Прогнозирование климатической стойкости полимерных материалов, применяемых в строительстве // Вестник ТГАСУ, 2009, №2, с. 127-141.
2. Степанов М.Н., Зинин А. В. Прогнозирование характеристик сопротивления усталости материалов и элементов конструкций. М.: Инновационное машиностроение, 2007. 392 с.
3. Башкарев А. Я., Веттегрен В.И., Сулов М. А. Долговечность полимерных композитов, СППТУ, СПб, 2016. – 147 с.
4. Булманис В.Н., Старцев О.В. Прогнозирование изменения прочности полимерных волокнистых композитов в результате климатического воздействия. Препринт, – Якутск, 1988. – 32 с.
5. Gusev E.L. Using parallel procedures for the searching of the extremum for the decision of the inverse problems prediction of the defining characteristics of the composite materials // Material Physics and Mechanics, 2016, v.26, N 1, p. 70-72.
6. Гусев Е.Л., Бакулин В.Н. Вариационные постановки обратных задач прогнозирования остаточного ресурса композитов // Доклады Академии наук, 2018, т. 482, №3, с. 281-286.
7. Гусев Е.Л. Методы решения обратных задач прогнозирования остаточного ресурса композитов в уточненных вариационных постановках на основе принципа множественности моделей прогнозирования // В сб. трудов Всероссийской конференции «Механические свойства современных конструкционных материалов», М., ИМЕТ, 2018, с. 53.

РАЗРАБОТКА И ПРИМЕНЕНИЕ КОМБИНИРОВАННЫХ МЕТОДОВ ОПТИМИЗАЦИИ В УТОЧНЕННЫХ ВАРИАЦИОННЫХ ПОСТАНОВКАХ ЗАДАЧ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА КОМПОЗИТОВ

Гусев Е. Л., Черных В. Д.

Институт проблем нефти и газа СО РАН

Якутск, Россия

Северо-Восточный федеральный университет им. М. К. Аммосова

Якутск, Россия

Проведено исследование вопросов о расширении потенциальных возможностей в повышении эффективности методов прогнозирования для решения задач оценки остаточного ресурса, надежности, долговечности композиционных материалов и конструкций при воздействии экстремальных внешних факторов. Показано, что применение для решения задач прогнозирования методов, связанных с построением в качестве перспективных взаимно-сопряженных направлений поиска позволяет значительно повысить эффективность прогноза. Приведены сравнительные вычислительные эксперименты. The problems of expanding the potential opportunities for improving the efficiency of forecasting methods for solving problems of assessing the residual resource, reliability, and durability of composite materials and structures under the influence of extreme external factors

are investigated. It is shown that the use of methods for solving forecasting problems associated with the construction of mutually connected search directions as promising ones can significantly increase the effectiveness of the forecast. Comparative computational experiments are presented.

В последние десятилетия одной из важных задач при разработке различных конструкций, машин и механизмов является создание надежных методов количественной оценки работоспособности изделий из полимерных и композиционных материалов [1–9]. Специфика исследуемых задач прогнозирования изменения прочности полимерных композитов под воздействием экстремальных факторов приводит к тому, что для этих задач подход экстраполяции в традиционной постановке является малоэффективным. Как отмечено в ряде работ [1–6], принципиальное усовершенствование подхода экстраполяции может быть достигнуто на основе выбора математической модели с ориентацией на физические представления.

В настоящее время проблемы математического моделирования задач прогнозирования ресурса, надежности конструкций из полимерных композитов при воздействии экстремальных климатических факторов внешней среды, решаются в значительно упрощенных постановках, не учитывающих значительное число факторов, оказывающих существенное влияние на точность решения. Как правило, применяемые модели прогнозирования имеют небольшое число неопределенных параметров, что не позволяет достичь необходимой степени адекватности модели реальной ситуации. При этом составной частью проблемы разработки эффективных методов прогнозирования остаточного ресурса является решение проблемы эффективного построения глобально-оптимальных решений, доставляющих абсолютный минимум многопараметрическим критериям эффективности, связанным с решением задач прогнозирования остаточного ресурса полимерных композитов при воздействии экстремальных факторов внешней среды. Проблема же достоверного построения глобально-оптимальных решений сложнопостроенных многопараметрических критериев эффективности в настоящее время является чрезвычайно сложной. При решении проблем такого рода значительную актуальность представляет разработка и модификация эффективных методов поиска абсолютного экстремума многопараметрических функций с учетом специфических особенностей задач прогнозирования изменения прочности полимерных композитов.

В работе [10] был предложен метод поиска экстремума многопараметрических функций с оптимальным выбором параметров для решения обратных задач прогнозирования изменения прочности полимерных композитов при воздействии экстремальных факторов внешней среды. Для задач, в которых абсолютные минимумы показателей эффективности расположены на направлениях, вдоль которых наблюдается наиболее значительное их убывание, предлагаемый подход будет являться достаточно эффективным. Однако в наиболее распространенных ситуациях, связанных с решением задач прогнозирования, зависимость показателей эффективности от определяющих параметров, имеют достаточно сложную структуру, при которой абсолютные минимумы могут не находиться вдоль направлений, вычисленных указанным способом. В работе [11] для решения более сложного круга обратных задач прогнозирования изменения прочности полимерных композитных конструкций при воздействии экстремальных климатических факторов, описываемых моделями, в которых зависимость показателей эффективности $J(u)$ от определяющих параметров $u_1, u_2, \dots, u_n$ имеет более усложненную структуру, разработаны модификации методов возможных направлений с определением оптимальных направлений поиска. Проведенные вычислительные эксперименты показали, что наибольшей эффективностью обладает комбинированный подход, связанный с последовательным применением разработанных методов, основанных на существенно различающихся принципах. При этом

наибольший эффект дает следующая последовательность применения разработанных методов: 1). Применение модификации метода поиска экстремума многопараметрических функций с оптимальным выбором параметров, изложенной в работе [10]; 2) Применение модификации методов возможных направлений с определением оптимальных направлений поиска, изложенной в работе [11]; 3) Применение модификации релаксационных методов, когда оптимальные направления поиска совпадают с направлениями координатных осей, изложенной в работе [12].

Исследован вопрос о расширении потенциальных возможностей в повышении эффективности методов прогнозирования для решения задач оценки остаточного ресурса, надежности, долговечности композиционных материалов и конструкций при воздействии экстремальных внешних факторов. Один из перспективных путей повышения потенциальных возможностей связан с совершенствованием методов построения оптимальных направлений поиска абсолютного минимума показателей эффективности. Проведен сравнительный качественный анализ методов выбора в качестве наиболее перспективных направлений поиска абсолютного минимума исследуемых показателей эффективности, взаимно сопряженных направлений поиска. Проанализированы преимущества методов поиска абсолютного экстремума показателей эффективности, когда в качестве перспективных направлений поиска выбираются взаимно сопряженные направления. Применение для решения задач прогнозирования методов, связанных с построением в качестве перспективных взаимно-сопряженных направлений поиска позволяет значительно повысить эффективность прогноза. Приведены сравнительные вычислительные эксперименты.

Литература

1. Уржумцев Ю. С., Черский И. Н. Научные основы инженерной климатологии полимерных и композитных материалов // Механика композитных материалов, 1985, № 4, с. 708–714.
2. Болотин В. В. Прогнозирование ресурса машин и конструкций. М., 1984. 312 с.
3. Булманис В.Н., Ярцев В. А., Кривонос В. В. Работоспособность конструкций из полимерных композитов при воздействии статических нагрузок и климатических факторов// Механика композитных материалов, 1987, № 5, с. 915-920.
4. Карпунин О. Н. Определение срока службы полимерного материала как физико-химическая проблема// Успехи химии, 1980, № 8, с. 1523-1553.
5. Булманис В.Н., Старцев О.В. Прогнозирование изменения прочности полимерных волокнистых композитов в результате климатического воздействия, препринт. – Якутск: Якутский филиал СО АН СССР, 1988. -32 с.
6. Филатов И.С., Бочкарев Р.Н. Некоторые проблемы оценки и прогнозирования климатической устойчивости полимерных материалов//Методы оценки климатической устойчивости полимерных материалов, Якутск, ЯФ СО АН СССР, 1986, с. 11-20
7. Башкарев А. Я , Веттегрень В.И., Суслов М. А. Долговечность полимерных композитов, СППТУ, С-Птб, 2016. – 147 с.
8. Реутов, А. И. Прогнозирование климатической стойкости полимерных материалов, применяемых в строительстве // Вестник ТГАСУ, 2009, №2, с. 127-141.
9. Степанов М.Н., Зинин А. В. Прогнозирование характеристик сопротивления усталости материалов и элементов конструкций. М.: Инновационное машиностроение, 2007. 392 с.
10. Гусев Е.Л., Бабенко Ф.И. Методы поиска экстремума с оптимальным выбором параметров для решения задач восстановления параметров моделей прогнозирования определяющих характеристик полимерных композитов//Сб. трудов «Материалы для технических устройств и конструкций, применяемых в Арктике», М., Всероссийский институт авиационных материалов, 2015, с.132-141.
11. Гусев Е.Л. Применение методов возможных направлений с определением оптимальных направлений поиска для решения обратных задач прогнозирования изменения прочности полимерных композитных конструкций при воздействии экстремальных климатических факторов// Международный журнал «Educatio», 2015, т.13, № 6, с. 68-71.
12. Гусев Е.Л. Релаксационные методы в прогнозировании определяющих характеристик при воздействии экстремальных факторов внешней среды// Международный журнал Международного союза ученых «Наука. Технологии. Производство», 2015, № 8, с. 4-7.

КОЭФФИЦИЕНТ ОБЛУЧЕННОСТИ И МЕТОД ЕДИНИЧНОЙ СФЕРЫ

Шадрин В. Ю.¹, Семенов М. Ф.², Иванов Г. И.^{1,3}, Матвеева О. И.¹

¹ Северо-Восточный федеральный университет им. М. К. Аммосова, Якутск, Россия

² Якутский институт водного транспорта (филиал) Сибирского государственного университета водного транспорта, Якутск, Россия

³ Институт проблем нефти и газа СО РАН, Якутск, Россия

Предложен метод приближенного вычисления коэффициента облученности (углового коэффициента) между двумя поверхностями, основанный на комбинировании кубатурной формулы [1, 2, 3] и метода сферы единичного радиуса [4]. В численных экспериментах показана высокая точность предлагаемого метода при существенно малых затратах вычислительного времени по сравнению с кубатурными формулами.

A method is proposed for the approximate calculate of the irradiant coefficient (angular coefficient) between two surfaces, based on combining cubature formula [1, 2, 3] and the unit radius sphere method [4]. In numerical experiments, the high accuracy of the proposed method is shown at a significantly low computational time in comparison with cubature formulas.

Литература

1. Софронова Е.Ф., Шадрин В.Ю. О приближенном вычислении коэффициентов облученности при лучистом теплообмене между двумя плоскими выпуклыми четырехугольниками // Математические заметки ЯГУ. – 2006. – Том 13, вып. 1. – С. 166-174.
2. Шадрин В.Ю., Семенов М.Ф., Иванов Г.И. Коэффициент облученности между кругами при наличии между ними локального препятствия в виде прямоугольника // Вестник СВФУ. – 2017. – №1(57). – С. 72-77.
3. Шадрин В.Ю., Павлов Н. Н. Программный продукт «RADIANT» // Сборник трудов VIII Международной конференции по математическому моделированию. – 2017. – С. 118.
4. Зигель Р., Хауэлл Дж. Теплообмен излучением. – М.: Мир, 1975. – 934 с.

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ СИГНАЛОВ ПО МНОГОПРОВОДНЫМ ЛИНИЯМ ПЕРЕДАЧ

Ноговицын П. И., Григорьев Ю. М.

Северо-Восточный федеральный университет им. М. К. Аммосова,
Академия наук РС(Я), Якутск, Россия

Для уравнений многопроводной линии передачи найдены специальные соотношения в виде алгебраических связей между погонными параметрами, обобщающие известное условие Хевисайда для однопроводной линии. Для такого случая задача Коши и первая начально-краевая задача для этих уравнений решаются аналитически.

For the multiconductor transmission line's equations the special relations in the form of algebraic connections between per-unit-length parameters, generalizing the well-known Heaviside condition for a single-wire line, are found. For such a case, the Cauchy problem and the first initial-boundary value problem for these equations are solved analytically.

Повышение тактовой частоты и сложности делают вопросы распространения электромагнитных сигналов очень важными для разработчиков электронных схем и систем. В таких структурах широко используются высокоскоростные параллельные межсоединения, такие как кремниевый переходник, каналы малой дальности или встроенные шины [1, 2]. Их характеристики могут серьезно ухудшаться из-за высокочастотных эффектов, таких как задержка сигнала, отражение, дисперсия или перекрестные помехи. Межсоединения можно рассматривать как линии передачи и для них используется модель многопроводных линий передачи (МЛП) [3]. В данной работе

изучаются МЛП со специальными погонными параметрами, на основе которого, возможно, будут получены методы исключения перекрестных помех в МЛП [4]. Модели МЛП также используются при расчете токов и напряжений в линиях передач, индуцированных внешними электромагнитными полями [5-9].

МЛП представляет собой систему, состоящую из $(n+1)$ параллельных друг другу проводников, из которых один является общим (обратный или нулевой проводник) для остальных. Во многих практически важных случаях условия вдоль такой линии распространяются квази-поперечные электромагнитные волны. Модель МЛП применяется именно в таком приближении [3]. Основными физическими характеристиками линии являются погонные параметры: активные сопротивления R_k ; емкости C_{kl} , индуктивности L_{kl} проводников и проводимости G_{kl} , рассчитанные на единицу длины; $k, l = 1, 2, \dots, n$. Для однопроводной линии известно условие Хевисайда $LC=LG$, такая линия является неискажающей [3]. Для многопроводных линий полное обобщение условий Хевисайда еще не получено, хотя имеются определенные попытки [4, 10-12]. Опубликованное нами [4] специальные соотношения, в виде алгебраических связей между погонными параметрами, можно назвать «слабым» обобщением условия Хевисайда. Они похожи на обычное условие Хевисайда: $RC=LG$, $CR=GR$, но эти соотношения являются матричными. При выполнении, этих условий основные начально-краевые задачи для обобщенной системы телеграфных уравнений решаются аналитически. В общем случае такая линия не избавлена полностью от перекрестных помех. В данной работе проводятся дальнейшие исследования модели такой МЛП. Показано, что МЛП будет идеальной неискажающей при выполнении еще одного дополнительного свойства: скорости распространения волн в каждой волновой моде являются одинаковы. Математическим условием этого является наличие только двух, противоположных по знаку нечетных корней характеристической матрицы обобщенной системы телеграфных уравнений. Приведены примеры МЛП со «слабым» условием Хевисайда, проведены вычислительные реализации решений задач для таких МЛП.

Литература

1. H. Zhu, R. Shi, C. Cheng, and H. Chen. Approaching speed-of-light distortionless communication for on-chip interconnect. // Proc. Asia South Pacific Des. Autom. Conf. – Jan. 2007. – P. 684–689.
2. Lauretis M.D., Ekman J. and Antonini G. Delayed-rational Green's function-based method of transmission lines and the Heaviside condition. // In Proc. IEEE Elect. Des. Adv. Packag. Syst. – Dec. 2016. – P. 143–145.
3. C. R. Paul, Analysis of Multiconductor Transmission Lines, 2nd ed. / New York, NY: John Wiley & Sons. – 2008.
4. Nogovitsyn, P. I., & Grigor'ev, Y. M. Exact analytical solutions of multiconductor transmission line equations. // Paper presented at the AIP Conference Proceedings – 2021
5. Григорьев Ю.М., Орлова М.Н. Индуцированные перенапряжения в линии передач при разряде молнии между облаками // Математические заметки ЯГУ. – 2009. – Т. 16. № 1. – С. 129-142.
6. Григорьев Ю.М., Орлова М.Н. Математическая модель грозозовых перенапряжений в линии передач с учетом зависимости тока молнии от времени. // Вестник Якутского государственного университета. – 2007. – Т. 4. № 2. – С. 45-52.
7. Григорьев Ю.М., Орлова М.Н. Влияние ближнего разряда молнии на линию передачи. // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. академика М.Ф. Решетнева. – 2009. – № 1-1 (22). – С. 23-26.
8. Grigor'ev Y. M., Borisova M. N., Longinova V. Y, Ivanova A. A. Mathematical models of lightning-induced voltages in transmission lines in a permafrost region. // AIP Conference Proceedings. – 2017.
9. Grigor'ev Y. M., Borisova M. N., Longinova V. Y. and Popova A. A. The electrostatic component of lightning induced currents in a short transmission line on a permafrost. // AIP Conference Proceedings. – 2018.
10. Grigoriev Yuri. On a nondistorting transmission line. IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility. – 1994. – Sendai, Japan, – May 16–20. – P. 29-31.
11. Lombardi L., Antonini G., De Lauretis, M., Ekman J. On the Distortionless Propagation in Multiconductor Transmission Lines. // IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology. – 2018. – V. 8(4). – P. 538-545.
12. Hartman A., Antonini G., Ekman J. and De Lauretis M. Bandlimited Distortionless Material Design by an Approximation of the Heaviside Condition. // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. – 2020. – V. 62. Iss. 2. – P. 532–541.

КРАЕВЫЕ ЗАДАЧИ ДЛЯ УРАВНЕНИЙ СОСТАВНОГО ТИПА С РАЗРЫВНЫМИ КОЭФФИЦИЕНТАМИ

Григорьева А. И.

Северо-Восточный федеральный университет им М. К. Аммосова, Якутск, Россия

Работа посвящена исследованию разрешимости краевых задач с условиями сопряжения для дифференциальных уравнений составного типа с разрывными коэффициентами. It is investigated the solvability of boundary value problems with conjugation conditions for differential equations of composite type with discontinuous coefficients.

Краевые задачи для дифференциальных уравнений возникают при математическом моделировании многих процессов физики, механики, биологии и т. д., протекающих в многокомпонентных средах с различными характеристиками. Для классических дифференциальных уравнений (эллиптических, параболических, гиперболических) задачи с условиями сопряжения представляются хорошо изученными, что же касается дифференциальных уравнений составного типа, то этого сказать уже нельзя.

В настоящей работе будут приведены новые результаты о разрешимости краевых задач с условиями сопряжения для различных классов дифференциальных уравнений составного типа с разрывными коэффициентами. Суть этих результатов – в доказательстве существования регулярных решений тех или иных задач – решений, имеющих все обобщенные по С. Л. Соболеву производные, входящие в соответствующее уравнение.

МОДЕЛИРОВАНИЕ МОРОЗНОГО ПУЧЕНИЯ В СЛОЕ СЕЗОННОГО ОТТАИВАНИЯ ГРУНТОВ

Егорова Г. Н., Мордовской С. Д.

Северо-Восточный федеральный университет им. М. К. Аммосова, Якутск, Россия

В работе представлена математическая модель взаимодействия промерзающего пучинистого грунта с включением цилиндрической формы. Приведена оценка напряженного состояния в деформируемом слое твердомерзлого грунта с использованием значения сил учитывающих силу смерзания и силу выпучивания грунта.

The paper presents a mathematical model of the interaction of freezing heaving soil with the inclusion of a cylindrical shape. An assessment of the stress state in a deformable layer of solid-frozen soil is given using the values of forces taking into account the force of freezing and the force of buckling of the soil.

Территория Республики Саха (Якутия) находится в условиях вечной мерзлоты и сезонного промерзания грунтов. Большая часть территории сложена водонасыщенными грунтами, которые плохи тем, что из-за избытка воды в грунте при замерзании возможно морозное пучение грунтов, а при оттаивании резкое увеличение содержания воды, и грунты становятся нестабильными. Расположенные в пучинистых грунтах различные включения подвергаются выпучиванию, т. е. перемещаются вверх, если действующие на них нагрузки не уравновешивают силы пучения. В результате таких деформаций грунта в конструкции возникают нагрузки, приводящие к разрушению инженерных сооружений.

Рассматривается взаимодействие промерзающего пучинистого грунта с включением цилиндрической формы. Расчетная схема взаимодействия включения с промерзающим пучинистым грунтом по его боковой поверхности представлена в виде неподвижно закрепленной одним концом жесткой балки – консоли (рис. 1). При этом длина жесткой

балки-консоли определяется из условия равновесия между удерживающими балку силами смерзания твердомерзлого слоя грунта (ТСГ) с поверхностью фундамента:

$$P_{см} = \tau_c u z', \quad (1)$$

и силами морозного пучения:

$$P_0 = \rho_{пр} F_b, \quad (2),$$

где τ_c – прочность смерзания грунта с боковой поверхностью включения, равная сопротивлению сдвига; u – периметр включения; z' – глубина промерзания; F_b – площадь зоны влияния; $\rho_{пр} = q_{кр}$ ($q_{кр}$ – критическая нагрузка) [1,2].

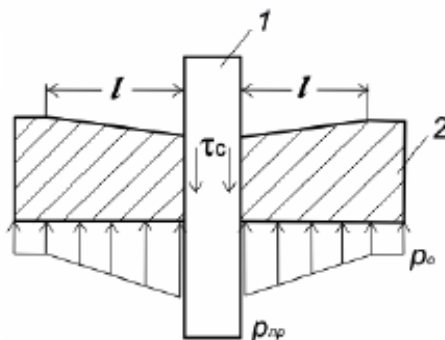


Рис. 1. Расчетная схема взаимодействия включения 1 с промерзающим и мерзлым грунтом 2

Выдергивание включения может происходить и при вмораживании нижней его части в мерзлый грунт ниже подошвы слоя сезонного протаивания. Условия устойчивости нарушается при мощности промерзшего слоя с учетом действия сил смерзания в нижней части включения представляются в виде [3]:

$$l_{мин} = \frac{(L - H_{пр}) \tau_{см}}{\tau_{см} + \tau_{сд}} + \frac{H_{пр} \tau_{сд}}{\tau_{см} + \tau_{сд}} + \frac{P}{\pi D (\tau_{см} + \tau_{сд})}, \quad (3)$$

где $H_{пр}$ – глубина подошвы слоя сезонно талого грунта, P – поровое давление.

При рассмотрении данной задачи использовался подход, основанный на численном решении стационарного дифференциального уравнения в частных производных. Уравнение описывает малые поперечные прогибы пластины, представляющей ТМГ с учетом сил упругости при перпендикулярных воздействиях внешних сил. Моделирование производилось при осесимметричном стационарном случае с использованием режима «Deformed Mesh». Результаты представленные на рис.2 соответствуют глубине 3 м, и значению давления на подошве 255,45 МПа.

В границе соприкосновения боковой поверхности включения с грунтом задаются значения сил учитывающие силу смерзания и силу выпучивания грунта, значения которых определяются по формуле 2 с использованием результатов натурных экспериментов [4]. Противоположный конец балки представляет собой фиксированную по Z границу.

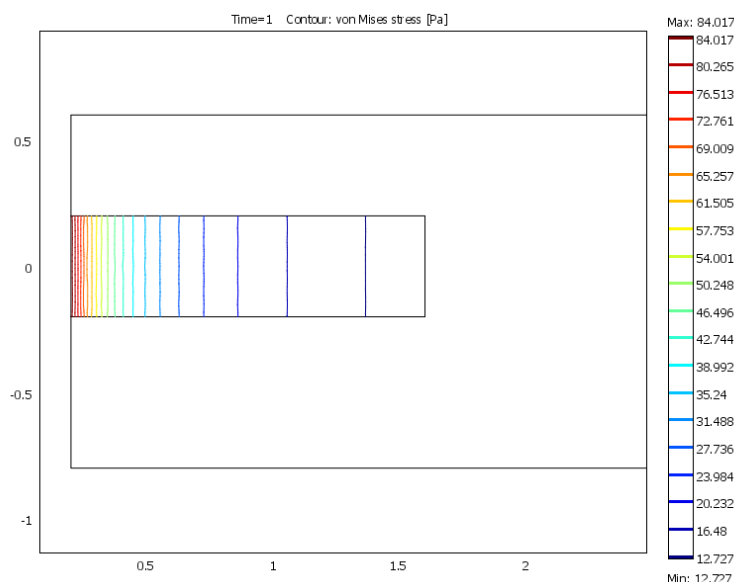


Рис. 2. Изобары в деформируемом слое ТМГ при значении давления на подошве в 255,45 МПа (соответствуют глубине $h=3$ м)

В данной работе продемонстрировано применение моделирования для оценки величины вертикального выпучивания включения за счет сезонного протаивания-оттаивания слоя грунта.

Литература

1. Абжалимов Р. Ш. Определение величины выпучивания грунта вокруг свай, самих свай и свайных ростверков, усилий в них на пучинистых грунтах // Развитие городов и геотехническое строительство. 2006. №10. с. 214 – 221.
2. Перетрухин Н. А. Взаимодействие фундаментов с промерзающим пучинистым грунтом // Морозное пучение грунтов и способы защиты сооружений от его воздействия: Тр. ВНИИТС. Вып. 62. М.: Транспорт, 1967. С. 74–99.
3. Изаксон В.Ю. Вопросы механики многолетнемерзлых горных пород. Якутск: ЯНЦ СО РАН СССР, 1991.-211 с.
4. СНиП 2.02.04-88 Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах.
5. Абрамов Л.Г., Кочерова Н.Д. Исследование процессов пучения грунтов // Вестник ВНИИ железнодорожного транспорта.- 1962.-№6.-С.14-16.

ФИЗИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РОСТА ХРУПКОЙ ТРЕЩИНЫ ПРИ ДИНАМИЧЕСКОМ ВОЗДЕЙСТВИИ НА СТАТИЧЕСКИ НАГРУЖЕННЫЙ ОБРАЗЕЦ С НАДРЕЗОМ

Петров В. Н., Лепов В. В.

Институт физико-технических проблем Севера им. В. П. Ларионова СО РАН
Якутск, Россия

Предложена модифицированная модель роста динамической трещины в вязкоупругом материале на основе структурного подхода, включающего термокинетическую концепцию С. Н. Журкова и критерий хрупкого разрушения Нейбера-Новожилова. Подход учитывает неоднородную микроструктуру материала и позволяет моделировать стадийность развития трещины, выявляемую фрактографическими исследованиями. Дан анализ основных параметров физически обоснованной модели, апробированной на данных эксперимента по импульсному расклиниванию образцов из полиметилметакрилата с острым боковым надрезом, нагружаемых статическим растяжением в широком диапазоне климатических температур.

The modified model for dynamic crack growth in viscoelastic material has been proposed. The model based on the structural approach that includes Zhurkov thermokinetic concept

and Neiber-Novozhilov criterion of brittle fracture. The structural approach describes the microstructure inhomogeneity of material and staging of crack propagation revealing by fractography as changing the scale of damage accumulation and fracture. The main parameters of the physical model approved on experimental data on pulse hit action of the striker to a notch of the previously hardly loaded single edge-notched specimen in wide range of environment temperatures has been analyzed in the paper.

В данной работе рассматривается рост хрупкой трещины при динамическом воздействии на предварительно статически нагруженный образец с надрезом. Материал образца ПММА (полиметилметакрилат). Испытания проводились на модельной установке «МИУ-1» (Магнитно-импульсная установка – 1), при разных уровнях статического нагружения, энергии удара и температурах [1, 2].

Исходя из положений термофлуктуационной теории, когда разрушение рассматривается не как предельное состояние материала, наступающее при достижении критических значений напряжения или деформации, а как кинетический процесс накопления повреждений, развивающийся в теле с момента приложения нагрузки, предполагается, что механические напряжения снижают барьер активации, облегчая разрыв когезионных связей в полимере. Непосредственное разрушение полимера объясняется образованием трещин в местах концентрации напряжений, а зарождение и развитие трещин рассматривается как следствие кинетического процесса термофлуктуационного разрыва связей [3] согласно активационной зависимости (закона долговечности) Журкова:

С учетом трактовки структурного размера в механике разрушения, предложенную Г. Нейбером и В. В. Новожиловым в одноимённом критерии следующего вида:

$$\frac{1}{d} \int_0^d \sigma dr \leq \sigma_c \quad (1)$$

где σ – главное растягивающее напряжение в окрестности вершины трещины ($r = 0$), а σ_c – предел прочности «бездефектного» материала. Главной особенностью является введение некоторого структурного размера d . Согласно работам Р.В. Гольдштейна и Н.М. Осипенко его рассматривают как линейный размер, характеризующий элементарную ячейку разрушения на данном масштабном уровне. [4, 5]

Обобщенный структурный подход трактует изменение структурного размера d в процессе развития процессов накопления повреждений как различие механизмов разрушения на различных масштабах [6]. На макроскопическом уровне d определяется по данным квазистатических испытаний образцов с трещинами и в соответствии с критерием Нейбера–Новожилова (1).

Таким образом, предлагается следующая модель роста хрупкой трещины при динамическом воздействии на предварительно статически нагруженный образец с надрезом:

$$X = \frac{A}{d} \exp\left(\frac{B\sigma_{\text{пр}} + W_{\text{Б}}}{kT}\right), \quad (2)$$

где X – длина трещины, T – температура, k – постоянная Больцмана, d – структурный размер, $\sigma_{\text{пр}}$ – приведенное напряжение (отношение приложенной нагрузки P к площади сечения образца), $W_{\text{Б}}$ – энергия удара бойка, A и B – поправочные коэффициенты размерностью $[m^2]$ и $[m^3]$, соответственно. Физический смысл коэффициентов, таким образом, состоит в нагружаемой площади и объёме материала, вовлеченного в процесс деформации.

Разработанная модель роста хрупкой трещины, основанная на физических представлениях о флуктуационном характере процесса разрушения, позволяет произвести переход от дискретных экспериментальных данных при комбинированном нагружении образца из вязкоупругого материала с неоднородной иерархией молекулярных

структур к набору непрерывных численных данных необходимых для расчета значений потока энергии, поступающего в вершину трещины, в широком диапазоне внешних воздействий, включая низкие температуры.

Литература

1. Петров В.Н., Лепов В. В. Критерии оценки трещиностойкости конструкционных материалов // Металлургия машиностроения, 2011. – 6. – С.12-14.
2. Петров В.Н., Лепов В. В., Семенов Х.Н., Ларионов В.П. Энергетический критерий разрушения полимерных материалов для случая комбинированного статико-динамического нагружения // Физическая мезомеханика, 2002. – 4(5). – С.67-72.
3. Бартенев Г.М. Прочность и механизм разрушения полимеров. – М.: Химия, 1984. – 280 с.
4. Гольдштейн Р.В., Осипенко Н.М. Разрушение и формирование структуры. // Докл. АН СССР, 1978. – 4(240). – С.829-832.
5. Гольдштейн Р.В., Осипенко Н.М. Структуры и процессы разрушения горных пород. // Построение моделей развития сейсмического процесса и предвестников землетрясений. Вып. 1.– М.: 1993.– С. 21-37.
6. Лепов В. В., Ачикасова В.С., Иванова А. А., Лепова К.Я. Структурный подход к многомасштабному моделированию эволюционных процессов в материалах с внутренней микроструктурой // Наука и образование, 2015. – 4. – С. 82-87.

ПОСТРОЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ЭКСПОНЕНЦИАЛЬНОГО РОСТА КЛЕТОК КРИОФИЛЬНЫХ МИКРООРГАНИЗМОВ В УСЛОВИЯХ ПЕРИОДИЧЕСКОГО КУЛЬТИВИРОВАНИЯ

Ерофеевская Л. А.
Институт проблем нефти и газа СО РАН
Якутск, Россия

Из объектов окружающей среды (почва, атмосферный воздух, снежный покров) и опытных образцов полимерных композиционных материалов, экспонируемых в зимний период в условиях открытого полигона выделено большое разнообразие криофильных микроорганизмов. Изучены их культурально-биохимические свойства, построена математическая модель экспоненциального роста выделенных штаммов в условиях периодического их культивирования.

A large variety of cryophilic microorganisms has been isolated from environmental objects (soil, atmospheric air, snow cover) and experimental samples of polymer composite materials exposed in winter in an open landfill. Their cultural and biochemical properties are studied, and a mathematical model of the exponential growth of isolated strains under conditions of their periodic cultivation is constructed.

На этапах технологического производства биологических препаратов, перспективных для профилактики и борьбы с биозаражениями и биоповреждениями строительных материалов и конструкций, специфической стадией является *культивирование микроорганизмов*. На этой стадии происходит синтез специфических белков, от которых зависит эффективность микроорганизмов, составляющих основу биопрепаратов. В процессе культивирования микроорганизмов необходимо одновременно с увеличением выхода биомассы добиваться того, чтобы штамм или консорциум не изменял свои биологические и культурально-биохимические свойства. Это достигается созданием оптимальных условий культивирования с учётом характеристик микроорганизмов. Для криофильных бактерий и грибов, как и для других микроорганизмов (мезофильных, термофильных и их промежуточных форм), характерны рост и размножение. Эти процессы заключаются в увеличении количества химических компонентов микробной клетки (например, белка, РНК, ДНК), итогом которых являются увеличение их размеров и массы, и увеличение числа клеток микроорганизмов в популяции.

В декабре 2020 г. путём целенаправленных микробиологических исследований, из объектов окружающей среды (почва, атмосферный воздух, снежный покров) и опытных образцов полимерных композиционных материалов, экспонируемых в зимний период в условиях открытого полигона, выделено большое разнообразие криофильных микроорганизмов, относящихся в большей степени к различным видам плесневых грибов родов: *Acremonium*, *Aspergillus*, *Mucor*, *Penicillium*, *Chaetomium*, *Rhizopus*, *Scopulariopsis* и спорообразующим бактериям из рода *Bacillus* (*B. subtilis*, *B. atropheus*, *B. cereus*). Изучены их культурально-биохимические свойства, построена математическая модель экспоненциального роста выделенных штаммов в условиях периодического их культивирования.

Накопительное культивирование осуществляли в 250-миллиметровых колбах в 3-х повторностях. Для этого в 100 мл минеральной среды М 9 [1], добавляли 1 грамм порошков, полученных из опытных образцов полимерных композитов, в качестве единственного источника углерода и энергии.

Содержимое колб культивировали в течение 10 суток на качалке при 180 об/мин. Далее готовили пяти- и десятикратные разведения в стерильном физиологическом растворе с последующими высевами в нескольких повторностях на среду Сабуро, Чапека и питательный агар. Инкубации посевов проводили при плюс 24 ± 1 °C. Через 24 часа фиксировали неспорообразующие бактерии; через 72 часа наблюдали рост спорообразующих бактерий, чрез 5–7 суток – плесневых грибов; через 5–14 суток – рост актинобактерий.

Для выделения чистых культур, выделенные микроорганизмы культивировали на твердых питательных средах после многократных пассажей из накопительных культур.

В ходе исследований установлены факторы влияющие на скорость роста полученных микробных штаммов: состав питательной среды, температуры, pH, содержание микроэлементов и других факторов. Было отмечено, что одни и те же культуры микроскопических грибов могли расти на среде Сабуро и не давать рост на среде Чапека и наоборот.

Установлено, что культура *B. subtilis* обладает способностью утилизировать полученные грибные культуры, нефтяные углеводороды, входящие в состав нефти, дизельного топлива, авиационного керосина и компоненты полимерных композиционных материалов (в частности, эпоксидную смолу), что является перспективным для дальнейшего изучения полученного штамма в качестве объекта биотехнологии.

Что касается кинетической закономерности роста и развития выделенных микроорганизмов, то она в первую очередь обуславливалась способом культивирования (периодическое или непрерывное) и типом оборудования, используемого в исследованиях.

Поскольку оборудование, используемое для периодического и непрерывного культивирования принципиально почти не различается, то для построения математической модели экспоненциального роста выделенных микробных культур были выбраны условия периодического культивирования микроорганизмов, характеризующегося простотой исполнения (однократная загрузка сырья с выгрузкой готового к использованию продукта), в отличие от непрерывного способа, для которого требуется постоянная загрузка сырья и отвод продуктов метаболизма, полуфабрикатов или готового продукта из аппарата.

В периодическом способе культивирования выделяют шесть фаз в развитии микробной культуры: период перестройки метаболизма клетки, синтеза ферментов и биосинтез белка (лаг-фаза); накопление биомассы и продуктов биохимических реакций (фаза экспоненциального роста клеток); линейный рост клеток (фаза линейного роста); снижение скорости роста культуры (фаза замедления роста); сохранение постоянства общей численности клеток (стационарная фаза). В случае, когда происходит полное

истощение системы по питательному субстрату или значительное накопление продуктов метаболизма, то наступает фаза отмирания культуры, сопровождаемая лизисом (растворением) клеток под влиянием различных агентов (лизатов), к которым могут относиться, например: бактериолизины, бактериофаги, ферменты, антибиотики.

В качестве отличительной особенности полученных микробных культур отмечены высокая скорость их размножения при температурах не выше $+10^{\circ}\text{C}$, которая оценивалась промежутком времени, в течение которого осуществлялся процесс деления микробной клетки. Это период называется временем генерации и, как выяснилось позже, он неодинаков у разных видов бактерий и грибов, выделенных из опытных образцов, что требует дополнительных исследований.

Работа выполнена в рамках проектов № 18-45-140009 p_a и № 0297-2021-0002.

Литература

1. Практикум по микробиологии: Учеб. Пособие для студ. высш. учеб. заведений / Нетрусов А. И., Егорова М. А., Захарчук Л.М. и др.; под ред. А. И. Нетрусова. – М.: Издательство «Академия», 2005. – 608 с.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ЛЬДООБРАЗОВАНИЯ В ВОДОЕМАХ

Мордовской С. Д., Васильева Н. В., Акимов М. П., Эверстов В. В.
Северо-Восточный федеральный университет имени М. К. Аммосова
Якутск, Россия

Рассматривается сезонная динамика льдообразования на водоемах. В работе предложен эффективный конечно-разностный метод решения однофазной задачи Стефана. Численный метод для решения одномерной задачи легко адаптируется для решения многомерных задач локально одномерным методом суммарной аппроксимации.

The seasonal dynamics of ice formation in water bodies is considered. An effective finite-difference method for solving the single-phase Stefan problem is proposed. The numerical method for solving a one-dimensional problem is easily adapted for solving multidimensional problems by a locally one-dimensional total approximation method.

Постановка полных гидродинамических моделей замерзания-оттаивания в объеме жидкости требует решения системы уравнений Навье-Стокса, что в сопряжении с постановкой задачи определения неизвестных границ раздела различных фаз, делает модели трудно реализуемыми. В таком положении постановка однофазной задачи Стефана в качестве основы модели представляется разумным компромиссом. Однако сложность при численной реализации заключается в существовании областей, где нет описания теплообмена на основе уравнений теплопроводности.

В качестве однофазной задачи Стефана рассматривается образование льда при изменении окружающей температуры. Расчетная область делится на талую и мерзлую зоны. В мерзлой зоне предполагается наличие ненулевых градиентов температуры, что задается основным кондуктивным переносом тепла. В талой зоне предполагается быстрый конвективный теплообмен, который определяет однородное распределение температуры. На границах зоны предполагается образование тонкой переходной области, и для описания теплообмена принимается теплообмен по закону Ньютона.

Для численной реализации решения одномерной задачи используется метод конечных разностей с фиксированной пространственной сеткой. Предлагаемый разностный метод предполагает использование фиктивных узлов, привязанных к границам раздела зон. Условие Стефана записывается именно для этих фиктивных узлов. Общая структура матрицы системы разностных уравнений предполагается трехдиагональной в области твердой фазы, с переходом на «однодиагональную» матрицу в

зоне жидкости, где принимается заданная температура. Такое представление СЛАУ обеспечивает «сквозное» решение по всей расчетной области. Исходя из структуры матрицы, для решения системы уравнений применяется метод прогонки.

Численный метод для решения одномерной задачи легко адаптируется для решения многомерных задач локально одномерным методом суммарной аппроксимации. В работе представлены результаты для двумерного варианта модели.

ГРУППОВАЯ КЛАССИФИКАЦИЯ И ИНВАРИАНТНЫЕ РЕШЕНИЯ СИСТЕМЫ УРАВНЕНИЙ ДИНАМИКИ НЕИЗОТЕРМИЧЕСКОЙ ДВУХФАЗНОЙ СРЕДЫ

Федоров В. Е.¹, Ядрихинский Х. В.²

¹ Челябинский государственный университет, Челябинск, Россия

² Северо-Восточный федеральный университет им. М. К. Аммосова, Якутск, Россия

Исследована групповая структура одной системы уравнений динамики двухфазной среды, учитывающей эффекты теплообмена [1]. Система состоит из шести уравнений, соответствующих двум уравнениям сохранения массы каждой из фаз, двум уравнениям сохранения импульса и двум уравнениям сохранения энергии. Получена групповая классификация [2] такой системы относительно произвольной функции, зависящей от внутренних энергий фаз и определяющей функцию давления. Для каждой из полученных в классификации спецификаций названной произвольной функции осуществлен поиск инвариантных подмоделей и инвариантных решений исследуемой системы. Вычислены также некоторые ее симметрии высокого порядка и законы сохранения [3].

The group structure of a system of equations of two-phase medium dynamics, taking into account the effects of heat transfer, is investigated. The system consists of six equations corresponding to two mass conservation equations for each phase, two momentum conservation equations, and two energy conservation equations. A group classification of such a system is obtained with respect to an arbitrary function that depends on the internal energies of the phases and determines the pressure function. For each of obtained in the classification specifications of the named arbitrary function, the search for invariant submodels and invariant solutions of the system under study is carried out. Some of its high-order symmetries and conservation laws are also calculated.

Литература

1. Яненко Н. Н., Солоухин Р. И., Папырин А. Н., Фомин В. М. Сверхзвуковые двухфазные течения в условиях скоростной неравновесности частиц. – Новосибирск: Наука, 1980. – 160 с.
2. Овсянников Л. В. Групповой анализ дифференциальных уравнений. – М.: Наука, 1978. – 400 с.
3. Bluman G.W., Cheviakov A.F., Anco S.C. Applications of Symmetry Methods to Partial Differential Equations. New York, Dordrecht, Heidelberg, London: Springer, 2010. – 398 p.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОТТАИВАНИЯ ВЕРХНЕГО СЛОЯ МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ПОРОД В РАЙОНЕ ГОРОДА ЯКУТСКА ПРИ ОТЕПЛЕНИИ КЛИМАТА ДО 2100 ГОДА

Иванов В. А., Рожин И. И.

Институт проблем нефти и газа СО РАН, Якутск, Россия

Происходящее в настоящее время беспрецедентно быстрое потепление климата в северных регионах оказывает значительное воздействие на множество природных экосистем [1]. Вероятно, что одним из эффектов будет масштабное оттаивание слоя многолетнемерзлых пород. Для прогноза динамики глубины оттаивания

мерзлых грунтов решается одномерная задача Стефана с помощью модели [2], разработанной для палеорекострукции теплового режима мерзлых горных пород. В использованной модели учитываются зависимости коэффициентов теплопроводности и теплоемкости пористой среды от содержания в ней воды и льда, зависимости теплопроводности воды и скелета пористой среды от температуры, а также зависимость температуры плавления льда от давления и содержания солей. В качестве входных данных численного расчета использованы данные термометрии скважин, исследований керна и данные по современному климату Центральной Якутии, в том числе динамика среднемесячной температуры воздуха, радиационного баланса земной поверхности и коэффициента теплообмена на поверхности с учетом снежного покрова. Учет годовых колебаний температуры воздуха и радиационного баланса позволяет точнее прогнозировать тепловое состояние приповерхностных грунтов. Рассмотрены два сценария потепления климата – рост среднегодовых температур со скоростью $2^{\circ}\text{C}/100$ лет и со скоростью $4^{\circ}\text{C}/100$ лет. В результате вычислительного эксперимента получены картины нестационарного теплового поля, которые показывают постепенное оттаивание многолетнемерзлых пород со временем. Результаты позволяют уточнить наши представления о пространственно-временных закономерностях того, как многолетнемерзлые толщи реагируют на протекающий сегодня процесс потепления климата, что необходимо для выработки мер по адаптации и смягчению последствий.

The unprecedentedly rapid climate warming in the northern regions is having a significant impact on many natural ecosystems. Probably one of its effects will be large-scale thawing of the permafrost layer. To predict the depth of thawing of the frozen ground, the 1D Stefan problem is solved with the help of a model developed for paleoreconstruction of the thermal regime of frozen rocks. The model used takes into account the dependences of the coefficients of thermal conductivity and heat capacity of the porous medium on the content of water and ice in it, the dependences of the thermal conductivity of water and the matrix of the porous medium on temperature, and also the dependence of the melting point of ice on pressure and salt content. Well thermometry, core research data, and data on the modern climate of Central Yakutia, including monthly average air temperatures, radiation balance of the earth's surface, and heat transfer coefficient on the surface taking into account snow cover, were used as input data for numerical calculation. Accounting for annual fluctuations in air temperature and radiation balance allows us to more accurately predict the thermal state of shallow ground. Two scenarios of climate warming are considered – an increase in average annual temperatures at a rate of $2^{\circ}\text{C}/100$ years and at a rate of $4^{\circ}\text{C}/100$ years. At the output of the computational experiment, we obtained pictures of an unsteady thermal field in the soil, which show the gradual thawing of permafrost soils over time. The results will allow us to clarify our ideas about the spatio-temporal patterns of how permafrost react to the ongoing process of climate warming, which is necessary to develop adaptation and mitigation measures.

Литература

1. Изменение климата, 2014 г.: Обобщающий доклад [Электронный ресурс]: Вклад Рабочих групп I, II и III в Пятый оценочный доклад Межправительственной группы экспертов по изменению климата [Основная группа авторов, Р. К. Пачаури и Л.А. Мейер (ред.)]. – МГЭИК, Женева, Швейцария, 2014. – С. 163. URL: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/SYR_AR5_FINAL_full_ru.pdf (дата обращения: 31.05.2021).
2. Galushkin Yu.I. Numerical simulation of permafrost evolution as a part of sedimentary basin modeling: permafrost in the Pliocene–Holocene climate history of the Urengoy field in the West Siberian basin // Canadian Journal of Earth Sciences. – 1997. – Vol. 34, №7. – Pp. 935-948.

МНОГОКОМПОНЕНТНЫЕ ДЕЛОКАЛИЗОВАННЫЕ НЕЛИНЕЙНЫЕ КОЛЕБАТЕЛЬНЫЕ МОДЫ В ГРАФЕНЕ

Семёнова М. Н.¹, Корзникова Е. А.²

¹ Политехнический институт (филиал)

Северо-Восточного федерального университета им. М. К. Аммосова
г. Мирный, Россия

² Институт проблем сверхпластичности металлов РАН
Уфа, Россия

Методом молекулярной динамики, основанным на хорошо апробированных межатомных потенциалах Савина, проанализированы свойства всех возможных одно-, двух- и трехкомпонентных ДНКМ в графене. Результаты компьютерного моделирования находятся в полном согласии с предсказаниями теории, основанной на анализе симметрии решеток. Подтверждено, что для графена существует четыре однокомпонентные, двенадцать двухкомпонентных и единственная трехкомпонентная ДНКМ.

The molecular dynamics method, based on the well-tested Savin interatomic potentials, is applied to the analysis of the properties of all possible one-, two-, and three-component DNVM in graphene. The results of computer simulations are in full agreement with the predictions of the theory based on the analysis of lattice symmetry. For graphene, it was confirmed that there are four one-component, twelve two-component and a single three-component DNVM.

Одним из важных разделов физики кристаллов является изучение колебаний кристаллической решетки, поскольку они определяют такие важные свойства как теплопроводность, теплоемкость, тепловое расширение и многие другие. Наряду с экспериментальными методами изучения нелинейной динамики кристаллической решетки, широко используются эффективные методы компьютерного моделирования, такие как первопринципное моделирование и метод молекулярной динамики.

В работе исследовались свойства многокомпонентных делокализованных нелинейных колебательных мод (ДНКМ) в графене. Графен выбран потому, что в силу уникального сочетания его физических и механических свойств (рекордно высокие прочность и жесткость, высокая тепло- и электропроводность, химическая стабильность и др.), он имеет высокий потенциал применения в нанотехнологиях. Для гексагональной решетки графена использовался межатомный потенциал sp^2 углерода, разработанный Савиным [1]. Это многочастичный потенциал, широко используемый для описания ковалентных химических соединений.

Структура гексагональной решетки графена с направлением зигзаг (кресло) вдоль оси $x(y)$ показана на рис. 1. Примитивные трансляционные ячейки в форме ромба со стороной a показаны пунктирными линиями. Вектора трансляции обеих решеток: $(a, 0)$ и $(a/2, a\sqrt{3}/2)$.

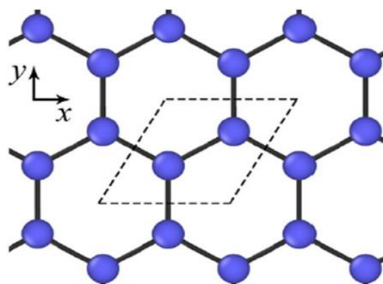


Рис. 1. Структура гексагональной решетки графена

Методом молекулярной динамики изучались одно-, двух- и трехкомпонентные моды. Применялся NVE ансамбль, так что число атомов, N , объем, V и полная энергия расчетного блока E сохранялись во времени. Атомы имеют три степени свободы – две компоненты движения в плоскости, а также компонента перемещения по нормали к плоскости листа графена. Для возбуждения ДНКМ атомам углерода задавались начальные смещения согласно схемам, описанным в [2, 3], при этом атомы имели нулевые начальные скорости.

Было точно установлено, что для графена существует четыре однокомпонентные ДНКМ, двенадцать двухкомпонентных ДНКМ и единственная трехкомпонентная ДНКМ. Опишем некоторые физические параметры трехкомпонентной ДНКМ в режиме периодических во времени колебаний. На рис. 2, как функции амплитуды корневой моды, показаны (а) частота, (б) энергия на атом и (в) средние за период колебания напряжения σ_{xx} и σ_{yy} , которые возникают в листе графена после инициации ДНКМ. Заметим, что при расчете напряжений предполагалось, что лист графена имеет толщину $3,3 \text{ \AA}$, равную расстоянию между атомными плоскостями в графите.

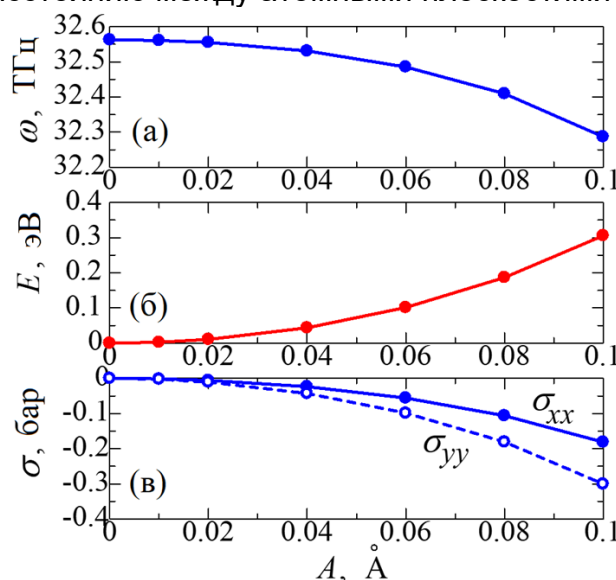


Рис. 2. Функции амплитуды корневой моды трехкомпонентной ДНКМ

Как следует из полученных результатов, частота трехкомпонентной ДНКМ уменьшается с ростом амплитуды, то есть данная мода имеет мягкий тип нелинейности. Энергия ДНКМ пропорциональна квадрату амплитуды корневой моды. Рост амплитуды корневой моды приводит к увеличению разницы между компонентами напряжений σ_{xx} и σ_{yy} . Отсюда следует, что возбуждение трехкомпонентной ДНКМ разрушает изотропию упругих свойств графена, который в обычном состоянии является упруго-изотропным. Аномалии в виде появления отрицательного давления при возбуждении трехкомпонентной ДНКМ не наблюдается, поскольку давление, определяемое как $p = -(\sigma_{xx} + \sigma_{yy})/2$, оказывается положительным при отрицательных значениях нормальных напряжений.

Результаты свидетельствуют о том, что колебания с амплитудой $A < 0.02 \text{ \AA}$ можно считать малыми, поскольку в этом диапазоне амплитуд влияние трехкомпонентной ДНКМ на свойства графена пренебрежимо малы, но становятся заметными при больших амплитудах.

Литература

1. Savin A.V., Kivshar Y.S., Hu B. Suppression of thermal conductivity in graphene nanoribbons with rough edges // Phys. Rev. – 2010. – Pp. 84–90.
2. Abdullina D.U., Semenova M.N., Semenov A.S., Ryabov D.S., Chechin G.M., Korznikova E.A., Baimova J.A., Dmitriev S.V. Stability of in-plane delocalized vibrational modes in triangular Morse lattice // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2018. – Vol. 447. – Is. 1 – No. 012060.

3. Chechin G.M., Ryabov D.S., Shcherbinin S.A. Nonlinear vibrational modes in graphene: group-theoretical results // Letters on Materials. – 2016. – Vol. 6. – Is 1. – Pp. 9–15.

ЗАДАЧА О РАВНОВЕСИИ ТЕРМОУПРУГОЙ ПЛАСТИНЫ КИРХГОФА-ЛЯВА С НАКЛОННОЙ ТРЕЩИНОЙ

Лазарев Н. П.

Северо-Восточный федеральный университет имени М. К. Аммосова, Якутск, Россия

В работе формулируется вариационная задача о равновесии термоупругой пластины Кирхгофа–Лява в области с разрезом. Предполагается, что пластина имеет наклонную трещину. Исходная постановка задачи предполагает выполнение на кривой трещины – краевых условий в виде неравенства, а на внешней границе – условий закрепления. Доказана разрешимость задачи, найдена эквивалентная дифференциальная постановка.

We formulate a new variational problem on the equilibrium of a thermoelastic Kirchhoff–Love plate in a domain with a cut. It is assumed that the plate has an inclined crack. The initial formulation of the problem presupposes the fulfillment of boundary conditions describing non-penetration of opposite crack faces in the form of inequalities on the crack curve in the form of inequalities. We impose conditions of rigid clamping on the external boundary of plate. Solvability of the problem is proved, an equivalent differential setting is found.

Формулируется новая вариационная задача о равновесии термоупругой пластины Кирхгофа–Лява в области с разрезом. Предполагается, что пластина имеет наклонную трещину. Исходная постановка задачи предполагает выполнение на кривой трещины – краевых условий непроникания противоположных берегов трещины в виде неравенств, а на внешней границе – условий закрепления. Доказана разрешимость задачи, найдена эквивалентная дифференциальная постановка. Отметим, что в рамках задач теории трещин с односторонними ограничениями, ранее были исследованы задачи для упругой пластины Кирхгофа–Лява с наклонной трещиной (см., например, [1]), а также для термоупругой пластины с вертикальной трещиной [2]. Результат получен на основе методов разработанных в [2], и обобщает известные результаты относительно вертикальных трещин для случая наклонных трещин в термоупругих пластинах.

Литература

1. Ковтуненко В. А., Леонтьев А. Н., Хлуднев А. М. Задача о равновесии пластины с наклонным разрезом // ПМТФ. – 1998. – Т. 39, No. 2. – С. 164–174.
2. Khludnev A.M. The equilibrium problem for a thermoelastic plate with a crack // Sib. Math.J. – 1996. – Vol. 37, No. 2. – Pp. 394–404.

ОБРАТНЫЕ КОЭФФИЦИЕНТНЫЕ ЗАДАЧИ ДЛЯ КВАЗИГИПЕРБОЛИЧЕСКИХ И БЛИЗКИХ К НИМ УРАВНЕНИЙ

Павлов С. С.

Якутский институт водного транспорта (филиал)
Сибирского государственного университета водного транспорта,
Академия наук РС(Я)
Якутск, Россия

Исследуется коэффициентная обратная задача для квазигиперболических уравнений высокого порядка. Устанавливается разрешимость обратной задачи нахождения вместе с решением дополнительной неизвестной функции $q(x)$. Доказываются теоремы существования и единственности решения коэффициентах обратных задач.

The coefficient inverse problem for high-order quasi-hyperbolic equations is investigated. The solvability of the inverse problem of finding together with the solution of the additional unknown function $q(x)$ is established. Theorems of the existence and uniqueness of the solution of the coefficients of the inverse tasks.

В работе исследуется линейная обратная задача для квазигиперболических уравнений – именно, задача нахождения функций $u(x, t)$ и $q(x)$, связанных уравнением

$$(-1)^m D_t^{2m} u + \Delta u + \mu u = f(x, t) + q(x)h(x, t),$$

$(D_t^k = \frac{\partial^k}{\partial t^k})$, $f(x, t)$ и $h(x, t)$ – заданные функции, μ – заданная постоянная.

Впервые постановку корректной краевой задачи для квазигиперболических уравнений предложил В.Н. Врагов [1], ряд результатов о разрешимости краевых задач и свойствах их решений имеются в работах И. Е. Егорова, В.Е. Федорова [2], А. И. Кожанова, Н. Р. Пинигиной [3].

Обратные задачи определения вместе с решением $u(x, t)$ квазигиперболического уравнения также компоненты (множителя) $q(x)$ правой части представляются мало изученными.

В настоящей работе доказываются существование и единственность регулярных решений $(u(x, t), q(x))$ изучаемой обратной задачи при задании финального условия переопределения. Используемый метод основан на переходе от обратной задачи к новой, но уже прямой задаче для дифференциального уравнения составного типа.

Литература

1. Врагов В.Н. О постановке и разрешимости краевых задач для уравнений смешанного типа // Матем. анализ и смежные вопросы математики. Новосибирск: Наука, 1987. С. 5–13.
2. Егоров И.Е., Федоров В.Е. Неклассические уравнения математической физики высокого порядка. Новосибирск: изд-во ВЦ СО РАН, 1995.
3. А. И. Кожанов, Н. Р. Пинигина, Краевые задачи для некоторых неклассических дифференциальных уравнений высокого порядка, Матем. заметки, 101:3 (2017), 403–412; Math. Notes, 101:3 (2017), 467–474.

КЛАССИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ПОИСКА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ СТАЦИОНАРНОГО ТЕЧЕНИЯ ГАЗА В ТРУБАХ

Павлов Н. Н., Пирожков А. Р.

Северо-Восточный федеральный университет им. М. К. Аммосова
г. Якутск, Россия

В работе рассматривается бинарный поиск для определения гидродинамических параметров λ – гидравлического сопротивления, и α – теплообмена, используя априорную информацию, которые получаются замером давления и температуры на выходе. The paper considers a binary search to determine the hydrodynamic parameters λ – hydraulic resistance, and α – heat transfer, using a priori information obtained by measuring pressure and temperature at the outlet.

Для использования численных методов необходимо иметь достоверную информацию о параметрах трубопровода, причём точность этой информации должна быть не ниже точности расчетов в рамках выбранной модели. Коэффициенты гидравлического сопротивления λ и теплообмена α – основные параметры модели неизотермического течения реального газа в трубах, обоснованный выбор которых – необходимое условие правильного расчета и эксплуатации трубопроводов и скважин.

Одним из способов определения данных параметров является использование априорной информации, которые получаются замером давления и температуры. В силу монотонной зависимости температуры и давления газа от гидродинамических

параметров λ и α , для их определения можно использовать классический метод бинарного поиска.

Рассмотрим результаты расчетов определения коэффициентов гидравлического сопротивления λ и теплообмена α для следующих исходных данных: давление на входе $p(0) = 200$ ат.; температура $T(0) = 320$ °К.

В таблице 1 приведены результаты расчетов определения λ для различных значений длины L трубы, замеров давления на устье скважины $p(L)$, массового расхода $M = 12$ кг/с.

Таблица 1

	$L=1000$		$L=2000$	
	$p(L)$	λ	$p(L)$	λ
Бинарный поиск	158.71	0.01000	128.73	0.01509
Метод прогонки [1]		0.01001	128.73	0.01509
Бинарный поиск	150.0	0.01999	119.9	0.01998
Метод прогонки [1]		0.01999	119.9	0.01994

В таблице 2 приведены результаты расчетов определения α для различных значений длины трубы – L и температуры на устье скважины – $T(L)$.

Таблица 2

	$L=1000$		$L=2000$	
	$T(L)$	α	$T(L)$	α
Бинарный поиск	309.69	11.62493	297.52	11.61235
	307.65	11.61711	295.05	11.61444

Достоверность результатов показана сравнением с результатами расчетов по методу прогонки [1] и решением прямой задачи с использованием вычисленных гидродинамических параметров.

Литература

1. Васильев О.Ф., Бондарев Э.А., Воеводин А.Ф., Каниболотский М. А. Неизотермическое течение газа в трубах. – Новосибирск: Наука, 1978. – 127 с.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ДВУМЕРНЫХ И ТРЕХМЕРНЫХ КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ СТРУКТУРАХ

Семёнов А. С., Якушев И. А.

Политехнический институт (филиал)

Северо-Восточного федерального университета им. М. К. Аммосова

Мирный, Россия

Смоделировано хаотическое движение (перемещение) атомов в двумерной и трехмерной кристаллических решетках, распределение по расчетной ячейке и выход атомов за её пределы, соотношение энергий связи в реальных металлах и расчетной модели, определен потенциал взаимодействия, который получился положительным, получены амплитудно-фазочастотные характеристики, прошедшие проверку на устойчивость.

The chaotic motion (displacement) of atoms has been modeled in two-dimensional and three-dimensional crystal lattices, as well as the distribution of atoms in the modelled cell and out-

ward, the ratio of binding energies in real metals and the computational model has been considered, the interaction potential was determined, which turned out to be positive, phase-frequency characteristics have been determined, which have passed the stability check.

С помощью пакета программ MatLab было смоделировано поведение (хаотическое движение) N -го количества атомов в кристаллической решетке методом молекулярной динамики. Ранее авторы для подобных целей использовали непосредственно программы МД моделирования, к примеру пакет LAMMPS [1-3]. Для реализации расчетов выбрали скоростную схему Верле [4]. В общем виде формулы выглядят следующим образом:

$$\begin{cases} \vec{r}(t + \Delta t) = \vec{r}(t) + \vec{v}\Delta t + \vec{a}\Delta t^2 / 2 \\ \vec{v}(t + \Delta t / 2) = \vec{v} + \vec{a}\Delta t / 2 \\ \vec{a}(t) = -\text{grad}(U(\vec{r}(t))) / 2 \\ \vec{v}(t + \Delta t) = \vec{v}(t + \Delta t / 2) + \vec{a}\Delta t / 2 \end{cases}, \quad (1)$$

Здесь U – потенциал Леннарда-Джонса [5], который был выбран из множества других парных потенциалов, как оптимально подходящий для условий нашей задачи:

$$U = 4\varepsilon \left[\left(\frac{\sigma}{r} \right)^{12} - \left(\frac{\sigma}{r} \right)^6 \right], \quad (2)$$

где σ – значение межатомного расстояния, при котором $\varphi(\sigma) = 0$, ε – глубина потенциальной ямы, расположенной на расстоянии $\sigma\sqrt[6]{2}$.

Моделирование производилось в двумерном (2D) и трехмерном (3D) пространствах, поэтому градиент в третьей формуле принимался сначала по двум, а затем по трем направлениям. Преобразование потенциала $U(\vec{r}(t))$ в $U(x(t), y(t))$ и $U(x(t), y(t), z(t))$ осуществлялось по формулам:

$$\begin{cases} \vec{r}_{2D} = x\vec{i} + y\vec{j} \\ \vec{r}_{3D} = x\vec{i} + y\vec{j} + z\vec{k} \end{cases} \quad (3)$$

В качестве исходных данных были выбраны 100 атомов с размером кристаллической решетки (ячейки) 10×10 для 2D моделирования и 1000 атомов с размером ячейки $10 \times 10 \times 10$ для 3D моделирования.

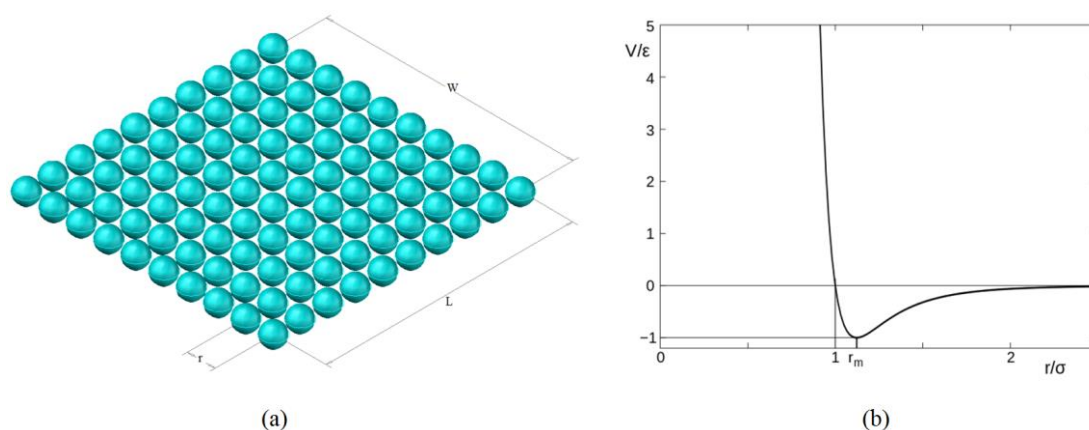


Рис. 1. Структура расчетной ячейки для моделирования (а) и характерный вид потенциала Леннарда-Джонса (б)

На рис. 1 (а) представлена двумерная расчетная кристаллическая решетка с параметрами $L \times W$. Характерный вид потенциала Леннарда-Джонса показан на рис. 1 (б).

Основными результатами моделирования являются: получение графической зависимости энергий связи между настоящей моделью и стандартными данными для

ячейки ГПУ металла; получение устойчивых амплитудно-фазочастотных характеристик; выявление положительного значения потенциала Леннарда-Джонса и вычисление его выборочного среднего значения; выявление единичных случаев покидания атомами зоны расчетной ячейки в результате хаотического перемещения.

Литература

1. Abdullina D.U., Semenova M.N., Semenov A.S., Korznikova E.A., Dmitriev S.V. Stability of delocalized non-linear vibrational modes in graphene lattice // European Physical Journal B. – 2019. – Vol. 92. – Is. 11. – No. 249. DOI: 10.1140/epjb/e2019-100436-y.
2. Shepelev I.A., Korznikova E.A., Bachurin D.V., Semenov A.S., Chetverikov A.P., Dmitriev S.V. Supersonic crowdion clusters in 2D Morse lattice // Physics Letters A. – 2020. – Vol. 384. – Is. 1. – No. 126032. DOI: 10.1016/j.physleta.2019.126032.
3. Krylova K.A., Lobzenko I.P., Semenov A.S., Kudreyko A.A., Dmitriev S.V. Spherically localized discrete breathers in bcc metals V and Nb // Computational Materials Science. – 2020. – Vol. 180. – No. 109695. DOI: 10.1016/j.commatsci.2020.109695.
4. Verlet L. Computer "experiments" on classical fluids. I. Thermodynamical properties of Lennard-Jones molecules // Physical Review. – 1967. – Vol. 159. – Is. 1. – Pp. 98–103. DOI: 10.1103/PhysRev.159.98.
5. Jones J.E. On the Determination of Molecular Fields. II. From the Equation of State of a Gas // Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. – 1924. – Vol. 106. – Pp. 463–477. DOI: 10.1098/rspa.1924.0082.
6. Цянь Сюэ-Сень. Физическая механика. – М.: Мир, 1965. – 544 с.

О РАЗРЕШИМОСТИ НЕЛОКАЛЬНЫХ КРАЕВЫХ ЗАДАЧ ДЛЯ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО УРАВНЕНИЯ СОСТАВНОГО ТИПА

Тарасова Г. И.

Северо-Восточный федеральный университет им. М. К. Аммосова,
Академия наук Республики Саха (Якутия)
Якутск, Россия

В работе изучаются нелокальные по временной (выделенной) переменной задачи для дифференциальных уравнений составного типа третьего порядка – именно, для некоторых классов псевдогоперболических уравнений.

Целью работы является построение решений, доказательство теорем существования и несуществования, единственности и неединственности тех или иных нелокальных задач. Все построения в работе ведутся в классах регулярных решений – решений, имеющих все обобщенные по С. Л. Соболеву производные, входящие в уравнение.

In this paper, it is studied the nonlocal in a time (distinguished) variable problems for differential equations of composite type of the third order, namely, for some classes of pseudohyperbolic equations.

The aim of the work is to construct solutions, to prove theorems of existence and non-existence, uniqueness and non-uniqueness of certain non-local problems. All constructions in this work are carried out in the classes of regular solutions – solutions that have all generalized according to S.L. Sobolev derivatives in the equation.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЛАГОПЕРЕНОСА В ГЕОКРИОЛОГИИ

Пермяков П. П., Попов Г. Г.

Институт физико-технических проблем Севера им. В. П. Ларионова СО РАН
Якутск, Россия

Математическое моделирование является универсальным методом научного познания, в том числе в геокриологии. Создав триаду «модель–алгоритм–программа», исследователь получает в руки универсальный, гибкий и недорогой инструмент, кото-

рый вначале отлаживается, тестируется в «пробных» вычислительных экспериментах. Проведенные сравнительные численные эксперименты показывают, что предложенная математическая модель тепловлагоденоса с идентифицированным параметром незамерзшей воды повышает достоверность и работоспособность.

Mathematical modeling is a universal method of scientific knowledge, including geocryology. Having created the triad "model-algorithm-program", researchers obtain a universal, flexible and inexpensive tool, which is first debugged, tested in trial computational experiments. Comparative numerical experiments show that the proposed mathematical model of heat and moisture transfer with the identified parameter of unfrozen water increases the reliability and efficiency of the model.

Математическое моделирование является универсальным методом научного познания, в том числе оно играет исключительно важную роль в геокриологии. Основным модулем геокриологии является задача промерзания-протаивания мерзлого грунта, названная задачей Стефана в честь немецкого ученого. Процесс промерзания-протаивания связана миграцией поровой воды дисперсной среды, которая сопровождается различными мерзлотными процессами, как пучение, просадка, термокарст и т. д. При математическом моделировании данной задачи столкнулись с серьезными проблемами, которые описаны в трудах различных исследователей. Например, с проблемой граничных условий, которая приведена в работе [1].

Методология математического моделирования приведена в работе Самарского, Михайлова [2]. Сама постановка вопроса о математическом моделировании какого-либо объекта состоит из трех основных этапов: *модель – алгоритм – программа*. Создав *триаду* «модель–алгоритм–программа», исследователь получает в руки универсальный, гибкий и недорогой инструмент, который вначале отлаживается, тестируется в «пробных» вычислительных экспериментах. После того как *адекватность* (достаточное соответствие) триады исходному объекту удостоверена, с моделью проводят разнообразные и подробные «опыты», дающие все требуемые качественные и количественные свойства и характеристики объекта. Процесс моделирования сопровождается, по мере необходимости, улучшением и уточнением всех звеньев триады.

Таким образом, первый шаг математической постановки задачи в общем случае подразумевает конструирование модели, т. е. качественное описание исследуемого процесса с помощью тех или иных операторов. Эта процедура называется *структурной идентификацией*. Основу математических моделей физических процессов чаще всего составляют дифференциальные операторы. Второй шаг математической постановки задачи заключается в наделении модели количественной информацией, т. е. в определении (оценивании) входящих в структурную математическую модель неизвестных характеристик (параметров модели). Этот этап носит название *параметрической идентификации*.

Структурная и параметрическая идентификация физических процессов тесно связана с решением обратных задач дифференциальных уравнений [3,4]. Для параметрической идентификации восстановлены параметры незамерзшей воды для различных грунтов с учетом водного режима. Предложенные формулы содержат много эмпирических параметров, и неизвестно как повлияют погрешности их определения на точность численного решения со временем.

Все теплофизические и массообменные характеристики дисперсных грунтов связаны функцией количества незамерзшей воды:

$$w_{\text{нв}}(T) = \begin{cases} w_{\text{нв}}, T \leq T_1 \\ d + a/|T - 273|^b, T_1 \leq T \leq T_2 \\ A + \frac{(T-T_2)(w_0-A)}{T_3-T_2}, T_2 \leq T \leq T_3 \\ w_0, T_3 \leq T \end{cases} \quad (1)$$

где $w_{\text{пс}}$, a , b , A , d , T_1 , T_2 , T_3 – эмпирические константы, определяемые по экспериментальным данным [5].

Для достоверного описания функции количества незамерзшей воды должны соблюдаться следующие требования [6]:

$$\lim_{T \rightarrow T_f^-} w_{\text{нв}}(T) = w_0 \quad (2)$$

$$\lim_{T \rightarrow T_f^-} w'_{\text{нв}}(T) = \infty \quad (3)$$

$$\lim_{T \rightarrow T_1^+} w_{\text{нв}}(T) = w_{\text{пс}} \quad (4)$$

$$\lim_{T \rightarrow T_1^+} w'_{\text{нв}}(T) = 0 \quad (5)$$

Первое условие (2) обозначает, что при положительной температуре влажность грунта находится в жидком состоянии. Условие (3) – интенсивный фазовый переход воды в лед, который происходит при понижении температуры ниже нуля градусов по Цельсию или промерзание свободной воды. Условие (4) прочносвязанная (или химическая связанная) влажность не замерзает $w_{\text{пс}}$, остается незамерзшей даже при низких температурах [7]. Последнее требование (5) обозначает, что процесс перехода воды в лед при температуре T_1^+ не происходит.

Идентификация теплофизических и массообменных характеристик в спектре температур с учетом реального процесса фазового перехода порового раствора меняет структуру математической модели, что повышает её достоверность и работоспособность.

Проведенные сравнительные численные эксперименты показывают, что математическая модель тепловлагоденноса с идентифицированным параметром незамерзшей воды повышает достоверность и работоспособность. При этом модель учитывает реальные процессы промерзания-протаивания порового раствора грунта с помощью функции количества незамерзшей воды, которая получается в результате обработки конкретных экспериментальных данных. Численная реализация осуществляется сквозным методом без выделения фронта фазового перехода и без искусственных параметров сглаживания.

Литература

1. Гречищев С.Е., Чистотин Л.В., Шур Ю.Л. Криогенные физико-геологические процессы и их прогнозы. – М.: Недра, 1980. – 383 с.
2. Самарский А. А., Михайлов А. П. Математическое моделирование: Идеи. Методы. Примеры. – 2-е изд., испр. – М.: Физматлит, 2001. – 320 с.
3. Алифанов О.М., Артюхин Е.А., Румянцев С.В. Экстремальные методы решения некорректных задач. – М.: Наука, 1988. – 288 с.
4. Алифанов О.М., Будник С.А., Ненарокомов А. В., Нетелев А. В. Диагностика теплового воздействия на лобовой экран спускаемого аппарата методом обратных задач // Труды шестой Российской национальной конференции по теплообмену. – Москва: МЭИ, 2014. – С. 1280-1283.
5. Пермиков П.П. Идентификация параметров математической модели тепловлагоденноса в мерзлых грунтах. Новосибирск: Наука, 1989. – 86с.
6. Lu J.G., Pei W.S., Zhang M.Y. et al. Evaluating of calculation models for the unfrozen water content of freezing soils. Journal of Hydrology. 2019. 575. Pp. 976-985.
7. Ершов Э.Д. Влагоденносо и криогенные текстуры в дисперсных породах. – М.: Изд-во МГУ, 1979. – 214 с.

МЕТОД РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ КРИОГЕННОГО ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА В ГОРНЫХ ПОРОДАХ В ПРИЛОЖЕНИИ К РАСПРЕДЕЛЕНИЮ И УСЛОВИЯМ ФОРМИРОВАНИЯ ЛЬДИСТОСТИ В ПРОМЕРЗАЮЩИХ ОСАДОЧНЫХ ПОРОДАХ

Попов В. И.

Институт горного дела Севера им. Н. В. Черского СО РАН
Якутск, Россия

Н. А. Цытовичем сформулирован принцип, утверждающий, что «...количество, состав и свойства незамерзшей воды и льда, содержащихся в мерзлых грунтах не остаются постоянными, а изменяются с изменением внешних воздействий, находясь в динамическом равновесии с последними».

Инструментом анализа адекватным высказанному принципу служит термодинамический подход, опыт применения которого для задач промерзания достаточно разнообразен. В рамках данного подхода рассмотрен случай, когда параметры состояния – концентрация, влажность и температура меняются по координате и определяются из решения уравнений баланса тепла и компонентов. Вывод уравнений сводится к последовательному учету вклада конвективного, диффузионного и миграционного потоков. А также процессов в порах породы – сорбции ионов и изменения их концентрации за счет химических реакций и роста кристаллов льда.

Задачи совместного тепло-влаги-солепереноса при фазовых превращениях решаются методом введения эффективной теплоемкости. Но возникают некоторые проблемы связанные с процедурой распределения источника тепла (и массы) фазового превращения в некотором температурном диапазоне. При этом становится затруднительным выполнение требования однозначной связи между влажностью породы, содержанием растворенных компонентов и температурой. Последняя определяется как осредненный результат решения уравнения теплопроводности, теряя свое значение параметра фазового равновесия.

В соответствии с разработанным методом система уравнений баланса предварительно расщепляется по физическим процессам. Для иллюстрации метода, в качестве этих процессов выбраны а) диффузионное выравнивание полей температуры, влажности и концентрации, и б) фазовый переход. Поэтому решение исходной задачи представляется в виде последовательного решения подзадач: а) диффузии и б) фазового перехода.

В рамках подзадачи (б) определяются локальные содержания тепла, влаги и соли для условий термодинамически изолированной подсистемы в расчетном узле.

Для определения стока влаги Δm на временном шаге в результате расщепления задачи и использования уравнения фазового состояния поровой влаги получено простое соотношение

$$\Delta m = c_t(T_2 - T_1)/(L + c_t \left(\frac{\partial T_F}{\partial w} \right)) + (c_w - c_{lod})T_1,$$

Предлагаемый алгоритм решения задач тепломассопереноса с фазовым превращением, с использованием уравнения фазового равновесия сводится к выполнению на каждом шаге по времени следующих действий:

1. Решается система уравнений диффузионно-конвективного переноса тепла, влаги и солей без фазовых превращений.
2. По вышеприведенному выражению рассчитывается количество замерзшей (конденсировавшейся, сублимировавшейся) влаги.
3. По соотношениям справедливым для термодинамически изолированных подсистем рассчитываются равновесные составы фаз и компонентов, а затем температура фазового превращения $T_F = T_F(C, w)$.
4. Переход на следующий временной шаг (пункт 1).

Применимость представленного алгоритма к решению задач тепло-массопереноса достаточно универсальна. В качестве иллюстрации рассмотрен вопрос распределения и формирования льдистости в объеме промерзающей толщи осадочных пород при знакопеременной температуре среды теплообмена.

Установлен факт периодического льдовыделения в объеме породы.

Сравнение тестовых расчетов глубины промерзания с точным решением задачи Стефана дало расхождение в 6% для малых времен и около 2% для больших (>100 часов).

Контрольные расчеты показывают удовлетворительное описание процессов распределения тепла, влажности и концентраций. Имеется возможность непосредственно рассчитывать многозонные задачи, так как фазовое равновесие определяется в каждом расчетном узле. Налицо существенное снижение трудоемкости вычислений, так как задача в минимальной конфигурации сводится к решению трех нелинейных уравнений параболического типа без фазового перехода и расчету состава по балансовым формулам для изолированных подсистем.

ЧИСЛЕННАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ИЗВЛЕЧЕНИЯ ГАЗА ИЗ ГАЗОГИДРАТНОЙ ЗАЛЕЖИ Понижением Давления

Попов В. В.

Северо-Восточный федеральный университет им. М. К. Аммосова
Якутск, Россия

Рассматривается математическая модель процесса неизотермической фильтрации газа в газогидратном месторождении при снижении давления. Проведены исследования математических моделей учитывающих конвективный перенос тепла и эффект Джоуля-Томпсона. Проведен анализ результатов вариантов численных расчетов с учетом конвективного теплопереноса и эффекта дросселирования для разных режимов течения газа к скважине. Даны оценки слагаемых уравнения теплопроводности (уравнение сохранения энергии) как в отдельности так и в их сочетании. Проведено исследование влияния гидродинамических характеристик коллектора и природного газа на результаты численных расчетов.

A mathematical model of the process of non-isothermal filtration of gas in a gas hydrate field with a decrease in pressure is considered. The research of mathematical models taking into account convective heat transfer and the Joule-Thompson effect has been carried out. The analysis of the results of variants of numerical calculations taking into account convective heat transfer and the effect of throttling for different modes of gas flow to the well is carried out. Estimates of the terms of the heat conduction equation (the energy conservation equation) are given both separately and in combination. The study of the influence of the hydrodynamic characteristics of the reservoir and natural gas on the results of numerical calculations has been carried out.

Рассматривается способ извлечения газа из газ-газогидратного месторождения понижением давления. Математическая модель представлена системой уравнений сохранения массы, закона Дарси и закона сохранения энергии, содержащего слагаемые учитывающие фазовый переход. Также рассматривается математическая модель процесса неизотермической фильтрации газа в газонасыщенном пласте при снижении давления без учета фазового перехода. Дана оценка вклада конвективного переноса тепла и эффект Джоуля-Томпсона.

Уравнение неразрывности потока газа (для простоты и наглядности) с учетом закона Дарси представлено в виде:

$$c\rho\phi\frac{\partial}{\partial t}\left(\frac{p}{RT_z}\right)=\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\frac{p}{RT_z}\frac{\partial p}{\partial r}\right)+\phi\varepsilon\rho_h\frac{\partial v}{\partial t}$$

Уравнение сохранения энергии имеет вид:

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{kf}{\mu} c_g \rho \frac{\partial T}{\partial x} \frac{\partial p}{\partial x} - \frac{kf}{\mu} \frac{T}{z} \frac{\partial z}{\partial T} \left(\frac{\partial p}{\partial x} \right)^2 + \phi \rho_h q_h \frac{\partial v}{\partial t}$$

Проведен анализ математической модели неизотермического течения газа к эксплуатационной скважине в процессе добычи газа из газогидратной залежи.

Как показали численные расчеты нельзя заранее предсказать преобладание того или иного фактора (слагаемого) на распределение температуры и гидратонасыщенности.

На рисунках 1-4 приведены результаты численных расчетов.

На рис. 1 – 2 дано сравнение результатов с учетом только конвективного слагаемого и обоих слагаемых для чисто газовой залежи (без учета образования или разложения газогидратов).

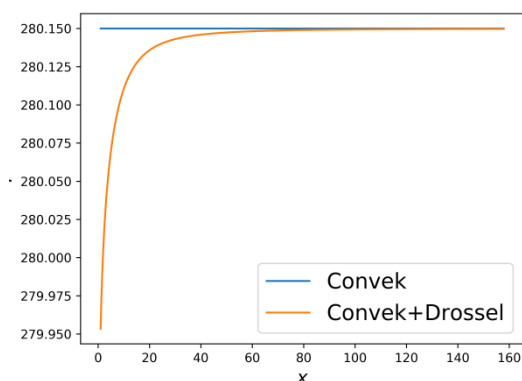


Рис. 1

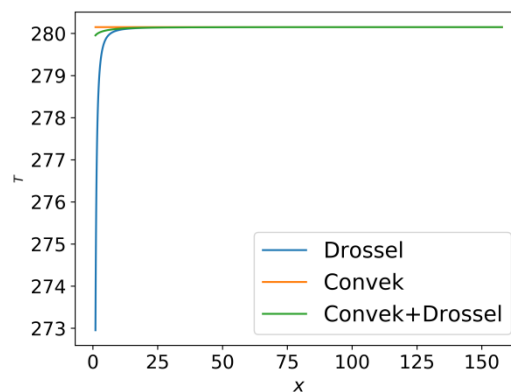


Рис. 2

На рис. 3 и 4 приведены распределение гидратонасыщенности с учетом только конвективного и только Дроссель-эффекта с распределением, когда учитываются обе слагаемые.

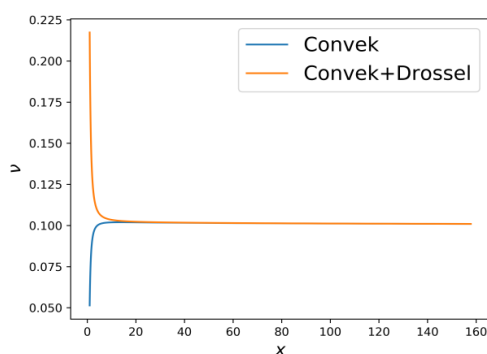


Рис. 3

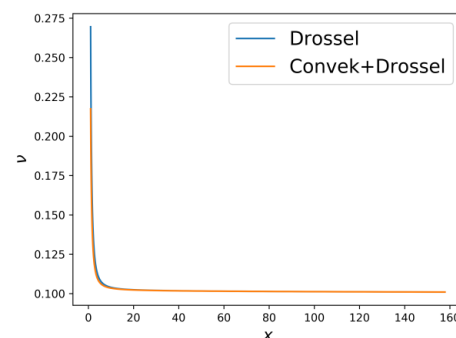


Рис. 4

О НЕЛОКАЛЬНЫХ ИНТЕГРО-ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ ЗАДАЧАХ МНОГОМЕРНЫХ ДИФфуЗИОННЫХ ПРОЦЕССОВ

Попов Н. С.

Северо-Восточный федеральный университет имени М. К. Аммосова
Якутск, Россия

Нелокальные краевые задачи для одномерных параболических уравнений второго порядка с интегральными условиями на боковой границе рассмотрены в статьях А. И. Кожанова. Многомерные интегро-дифференциальные уравнения высокого порядка с интегральными условиями на боковой границе не исследовались. В данной статье

изучаются интегро-дифференциальные уравнения с интегральными условиями на боковой границе и доказываются теоремы существования регулярных решений. Для установления разрешимости используются методы регуляризации и продолжения по параметру.

Nonlocal boundary-value problems for one-dimensional parabolic second-order equations with integral conditions on the lateral boundary are considered in the articles by A.I. Kozhanov. Higher-dimensional integro-differential equations of higher order with integral conditions on the lateral boundary were not studied earlier. In the present article we study integro-differential equations with integral conditions on the lateral boundary and prove existence theorems for regular solutions. The methods of regularization and of continuation in a parameter are employed to establish solvability.

Нелокальные краевые задачи для параболических и гиперболических уравнений с интегральным условием на боковой границе активно изучаются в последнее время, но при этом в основном рассматривается лишь случай уравнений второго порядка по пространственным переменным [1]. Отметим также исследования для псевдопараболических и псевдогиперболических уравнений с интегральным условием на боковой границе [2].

Пусть Ω – ограниченная область пространства R^n с гладкой границей Γ , Q – цилиндр $\Omega \times (0, T)$, $S = \Gamma \times (0, T)$, $f(x, t)$ – заданная в цилиндре Q функция, $u_0(x)$ – заданная на множестве Ω функция, $K_i(x, y, t)$ ($i = 1, 2$) – функции, заданные при $x \in \overline{\Omega}$, $y \in \overline{\Omega}$, $t \in [0, T]$.

Краевая задача: найти функцию $u(x, t)$, являющуюся в цилиндре Q решением уравнения

$$\frac{\partial}{\partial t}(Au) - \Delta^2 u = f(x, t), Au = \int_0^t N(t - \tau)u(x, \tau)d\tau, \quad (1)$$

и такую, что для нее выполняются условия

$$u(x, 0) = u_0(x), u(x, t)|_{(x,t) \in S} = \int_{\Omega} K_1(x, y, t)u(y, t)dy|_{(x,t) \in S}, \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial \nu} u(x, t)|_{(x,t) \in S} = \int_{\Omega} K_2(x, y, t)u(y, t)dy|_{(x,t) \in S}. \quad (3)$$

Методами перехода к нагруженному уравнению с однородными краевыми условиями, продолжения по параметру доказывается регулярная разрешимость краевой задачи (1)–(3) [3].

Литература

1. Popov N.S. On solvability of boundary value problems for hyperbolic fourth-order equations with nonlocal boundary conditions of integral type // AIP Conference Proceedings. V.1907 (2017) 030008. doi.org/10.1063/1.5012630.
2. Popov N.S. Solvability of a Boundary Value Problem for a Pseudoparabolic Equation with Nonlocal Integral Conditions // Differential Equations, 2015, V.51, № 3, pp. 362–375.
3. Кожанов А. И. Краевые задачи для одного класса нелокальных интегро-дифференциальных уравнений с вырождением // Вестник Самарского университета. Естественная серия. 2017. Т.23, № 4. С.19–24.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛООВОГО ПРОЦЕССА В ПОЛИМЕРНОМ ПОДШИПНИКЕ СКОЛЬЖЕНИЯ С ВОЗВРАТНО-ВРАЩАТЕЛЬНЫМ ДВИЖЕНИЕМ ВАЛА

Тихонов Р. С., Старостин Н. П.
Институт проблем нефти и газа СО РАН
Якутск, Россия

Для самосмазывающегося радиального подшипника скольжения с возвратно-вращательным движением вала предлагается методика определения кинематических условий, при которых в математической модели теплового процесса можно исключить конвективный член. В этом случае вал рассматривается как неподвижный элемент, что

существенно упрощает расчеты. В отличие от ранних работ в методике используется трехмерная математическая модель теплового процесса. Соответствующее уравнение теплопроводности с сосредоточенным источником тепла решается методом конечных элементов.

In the article proposes a method for determining the kinematic conditions for a self-lubricating radial sliding bearing with a reciprocating motion of the shaft, at which the convective term can be excluded from the mathematical model of the thermal process. In this case, the shaft is considered as a stationary element, which greatly simplifies the calculations. In the method we use a three-dimensional mathematical model of the thermal process in contrast to early works. The heat conduction equation with a concentrated heat source is solved by the finite element method.

Успешное определение мощности трения по температурным данным во многом зависит от адекватности математической модели реальному тепловому процессу в исследуемом сопряжении. На начальной стадии разработки метода тепловой диагностики трения используются математические модели теплового процесса в исследуемом узле трения, учитывающие основные особенности теплообмена в трущихся телах при упрощающих допущениях. Примером такого подхода может служить разработка метода ТДТ в самосмазывающихся подшипниках скольжения для возвратно-вращательного движения, позволяющего определять знакопеременный момент трения. Разработка расчетной методики определения кинематических условий, при выполнении которых необходимо в математической модели учитывать движение вала, выполнена решением плоской задачи теплопроводности в работе [1]. При использовании трехмерной модели в указанной методике необходимо уточнение условия учета движения вала.

Исследование влияния погрешности в температурных данных на решение обратной задачи методом итерационной регуляризации выполнено с использованием плоской модели в работе [2]. Полученные результаты показали возможность определения интенсивности фрикционного тепловыделения методом итерационной регуляризации с погрешностью, сопоставимой с уровнем погрешности измерения температуры. Используемый метод решения обратной задачи ТДТ позволяет обобщить полученный результат на трехмерный случай.

В данной работе предлагается развитие на трехмерный случай методики определения кинематического условия, при которых необходимо в модели теплового процесса учитывать возвратно-вращательное движение вала. Определение таких условий позволит при применении тепловой диагностики трения в реальных подшипниках скольжения использовать модели с допущением о неподвижности вала. Задача определения эволюции температурного поля в подшипнике скольжения с фрикционным тепловыделением в виде множества сосредоточенных источников тепла решена методом конечных элементов. Приводится анализ температурных полей в подшипнике, на основе которого излагается методика определения условий, при которых вал можно рассматривать как неподвижный элемент трибосопряжения.

Литература

1. Старостин Н. П., Кондаков А. С., Васильева М. А. Тепловая диагностика трения в самосмазывающихся радиальных подшипниках скольжения возвратно-вращательного движения. Часть 2. Учет в математической модели подвижности вала // Трение и износ, 2010. Т.1, №6. – С. 590- 594.
2. Starostin N.P., Kondakov A.S., Vasilieva M.A. Identification of friction heat generation in sliding bearing by temperature data // Inverse Problems in Science and Engineering. 2013. Vol. 21, No. 2 – PP. 298–313.

РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ РАСЧЕТА ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ СВАРКЕ С ПОДОГРЕВОМ СТАЛЬНЫХ ЛИСТОВ

Слепцов О. И., Слепцов Г. Н.

Институт физико-технических проблем Севера им. В. П. Ларионова СО РАН
Якутск, Россия

Целью настоящей работы является обосновать выбор технологических режимов сварки при помощи расчетных методик основанных на разработанной математической модели тепловых процессов при сварке. Расчетные формулы, выведенные на основе представления мгновенных источников тепла, с достаточной точностью согласуются с экспериментальными данными. По результатам проведенных работ получено аналитическое решение для расчета термического цикла сварки стальных пластин при сварке с подогревом, в том числе при низких температурах окружающего воздуха. Установлены зависимости процесса охлаждения между толщиной листа, протяженности сварного шва, мощности нагревателя, температуры подогрева и окружающей среды при сварке.

The purpose of this work is to substantiate the choice of technological modes of welding using calculation methods based on the developed mathematical model of thermal processes during welding. Calculation formulas derived from the representation of instantaneous heat sources agree with experimental data with sufficient accuracy. Based on the results of the work carried out, an analytical solution was obtained for calculating the thermal cycle of welding of steel plates during welding with heating, including at low ambient temperatures. The dependences of the cooling process between the sheet thickness, the length of the welded joint, the power of the heater, the heating temperature and the environment during welding have been established.

Сварка в условиях низких температур воздуха понижает стойкость сварных соединений к замедленному разрушению и образования холодных трещин [1]. Основной предпосылкой к исследованию особенностей сварки при низких температурах является изучение тепловых процессов. Это позволяет обосновать выбор параметров термического цикла сварки обеспечивающих прочность сварных соединений к возникновению холодных трещин.

Получено аналитическое решение для расчета термического цикла сварки стальных пластин при сварке с подогревом, в том числе при низких температурах воздуха. Показано, что расчетные формулы на основе мгновенных источников тепла с достаточной точностью описывают тепловые процессы при сварке с подогревом стальных листов и согласуются с экспериментальными данными (рис.1) [2]. Установлены зависимости процесса охлаждения между толщиной листа, протяженности сварного шва, мощности нагревателя, температуры подогрева и окружающей среды при сварке.

При сварке с подогревом процесс охлаждения в низкотемпературной области описывается формулой

$$T = \left[\frac{q_{\text{пор}}}{c_{\text{с}} \delta \sqrt{4\pi a t}} \Phi\left(\frac{l}{4at}\right) + T_{\text{под}} \right] \exp(-bt) + T_{\text{ср}} \quad (1)$$

После установления равномерного распределения температуры

$$T = [T_0 + T_{\text{под}}] \exp(-bt) + T_{\text{ср}} \quad (2)$$

Сопоставление расчетных данных (1) процесса охлаждения металла шва от 300°C до 100°C (t_{100}^{300}) с экспериментом показывает, что при правильном подборе коэффициента теплоотдачи совпадение расчетных и экспериментальных результатов удовлетворительное.

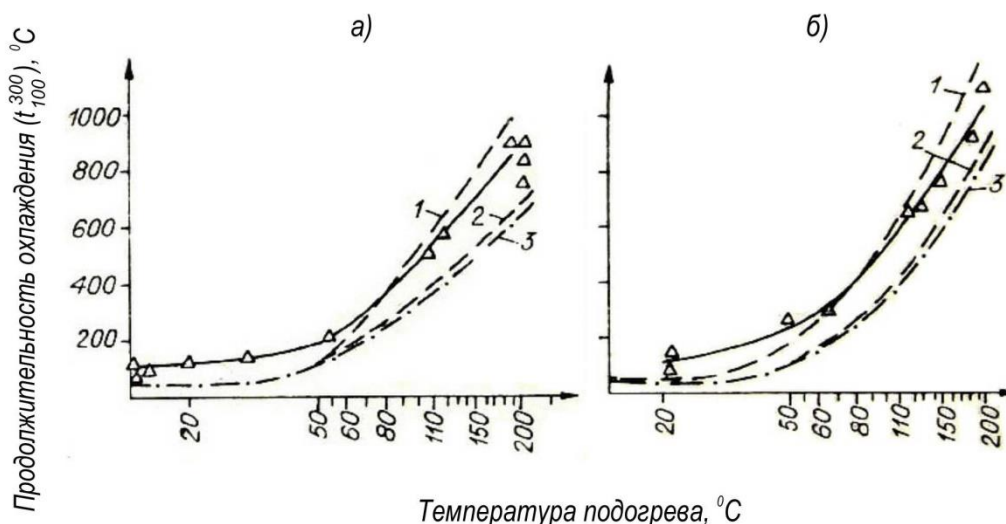


Рис. 1. Сравнение расчетных и экспериментальных данных зависимости параметра t_{100}^{300} от температуры подогрева листов.

а) – $\delta=12$ мм; б) – $\delta=16$ мм. 1 – $\alpha = 18,9$ Вт/м² °град; 2 – $\alpha = 26,5$ Вт/м² °град; 3 – $\alpha=27,7$ Вт/м² °град (расчет). $\Delta - T_{ср} = -350$ С (эксперимент)

Литература

1. Слепцов О.И., Шульгинов Б.С., Михайлов В.Е., Сивцев М.Н., Слепцов Г.Н. Повышение прочности сварных металлоконструкций горнодобывающей и транспортной техники в условиях Севера. Новосибирск: Наука, 2012. – 183 с.
2. Рыкалин Н. Н. Расчеты тепловых процессов при сварке. М.: Машгиз, 1951 – 296 с.

ВЛИЯНИЕ РАССЕЯНИЯ НА РАДИАЦИОННО-КОНДУКТИВНЫЙ ТЕПЛООБМЕН В ДВУХСЛОЙНОЙ ПОЛУПРОЗРАЧНОЙ СИСТЕМЕ

Тимофеев А. М.

Северо-Восточный федеральный университет имени М. К. Аммосова
Якутск, Россия

Численно анализируется тепловое состояние двухслойной полупрозрачной системы, расположенной на непрозрачной полубесконечной подложке. На внешней границе задано условие радиационного и конвективного теплообмена с окружающей средой. Постановка задачи моделирует, нагрев солнечным излучением гипотетического снежно-ледового покрова, состоящего из двух слоев с различными коэффициентами поглощения и рассеяния. Показано, что в зависимости от оптической толщины слоев, преобладания в них поглощения или рассеяния падающего излучения, более интенсивно могут прогреваться подповерхностные или более глубокие области среды.

The thermal state of a two-layer semitransparent system located on an opaque semi-infinite substrate is analyzed numerically. The condition of radiative and convective heat exchange with the environment is set at the outer boundary, The problem statement simulates the heating by solar radiation of a hypothetical snow-ice cover consisting of two layers with different absorption and scattering. It is shown that, depending on the optical thickness of the layers, the predominance of absorption or scattering of incident radiation in them, the sub-surface or deeper regions of the medium can be heated more intensively.

Формирование температурного поля в снежно-ледовой толще (СЛТ), носит сложный характер, зависящий от различных механизмов теплообмена и их взаимодействия. Солнечное излучение является одним из основных факторов, влияющих на тепловое состояние СЛТ. Падающий радиационный поток претерпевает граничное отражение, объемное поглощение и рассеяние, переизлучение. При этом оптические свойства снега и льда характеризуются сильной зависимостью от длины волны излучения, в частности, сильным поглощением в инфракрасном спектре, в то время как коротковолновое (солнечное) излучение может проникать в него на глубину десятков сантиметров. Кроме оптико-теплофизических параметров [1] формирование теплового режима СЛТ зависит также от конвективного и радиационного охлаждения на поверхности [2], теплового взаимодействия с подложкой [3]. Также, СЛТ нередко имеет слоистую структуру с различной зернистостью, что в свою очередь обуславливает различие в коэффициентах поглощения и рассеяния [4]. Таким образом, при решении задач теплообмена в СЛТ необходимо учитывать радиационный перенос в многослойной системе с различными оптическими свойствами: поглощением, рассеянием, оптической толщиной.

В настоящей работе численно решается задача радиационно-кондуктивного теплообмена в двухслойной полупрозрачной системе, моделирующей гипотетический снежный покров, состоящий из двух слоев с различными коэффициентами поглощения и рассеяния. На верхнюю границу системы падает внешнее излучение. Также, на внешней границе задано условие конвективного теплообмена с окружающей средой. Температура нижней поверхности системы формируется под действием пропущенного слоем излучения и отвода тепла теплопроводностью в непрозрачную полубесконечную подложку.

На основании предложенной модели радиационно-кондуктивного теплообмена в двухслойной полупрозрачной среде установлено, что в зависимости от оптической толщины слоев, преобладания в них поглощения или рассеяния падающего излучения, более интенсивно могут прогреваться подповерхностные или более глубокие слои СЛТ. Рассеивающий поверхностный слой в случае оптически плотной среды в результате высвечивания значительно снижает температуру поверхностных областей СЛТ. Также, заметная роль в теплообмене в полупрозрачной среде принадлежит поверхностному радиационному охлаждению в инфракрасной области.

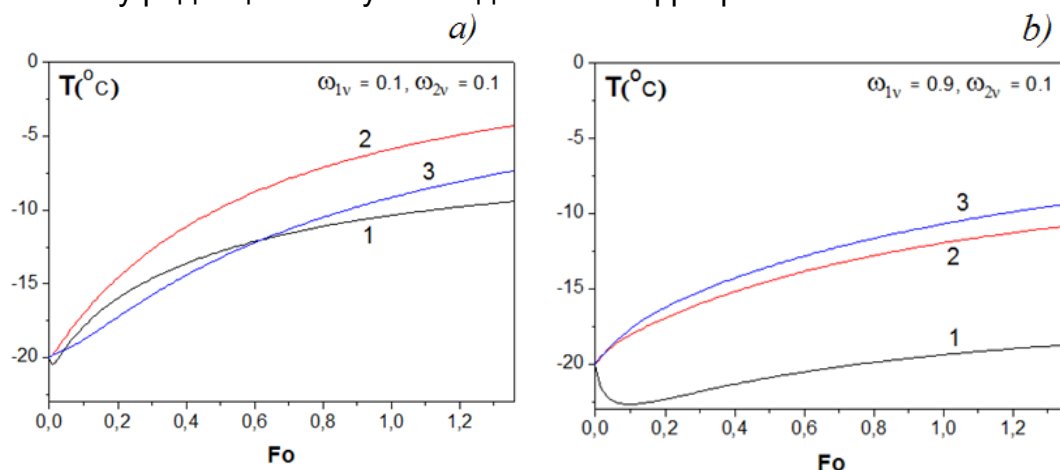


Рис. 1. Влияние рассеяния на динамику температуры в полупрозрачной двухслойной системе. 1 – внешняя поверхность, 2 – граница раздела слоев, 3 – подложка. (Обозначения параметров приняты из работы [5])

Литература

1. Красс М.С., Мерзликин В.Г. Радиационная теплофизика снега и льда / Ленинград: Гидрометеиздат, 1990. – 261 с.
2. Dombrovsky L.A., Kokhanovsky A.A., Randrianalisoa J.H. On snowpack heating by solar radiation: A computational model. // Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer. – 2019. – Vol. 227. – Pp.72–85.

3. Тимофеев А. М. Моделирование радиационного нагрева снежно-ледяного покрова // Теплофизика и аэромеханика. – 2018. -Т. 25, №. 5. – С. 797 – 804.
4. Warren S. G. Optical properties of snow // Rev. Geophys. Space Phys. -1982. -Vol. 20. – Pp. 67–89.
5. Тимофеев А. М. Влияние оптических свойств на радиационно-кондуктивный теплообмен в двухслойной полупрозрачной системе // Теплофизика и аэромеханика. – 2020. – Т. 27, №. 1. – С. 135 – 142.

ТЕПЛОПЕРЕДАЧА ЧЕРЕЗ ОГРАЖДАЮЩУЮ ПЛОСКУЮ КОНСТРУКЦИЮ С УЧЕТОМ ПАРНИКОВОГО ЭФФЕКТА

Алексеева Э. Б., Тимофеев А. М.

Северо-Восточный федеральный университет имени М. К. Аммосова
Якутск, Россия

Предложена инженерная модель расчета характеристик теплопередачи через ограждающую конструкцию здания с полупрозрачным экраном, позволяющую учитывать парниковый эффект. Проведенные на ее основе расчеты показывают важность учета оптических свойства экрана, температуры неба и других климатических факторов при оценке теплового режима купольных систем.

An engineering model for calculating the characteristics of heat transfer through the building envelope with a semitransparent screen is proposed, which allows to take into account the greenhouse effect. The calculations carried out on its basis show the importance of taking into account the optical properties of the screen, the temperature of the sky and other climatic factors when estimating the thermal regime of dome systems.

В связи с возрастающим интересом к строительству в северных регионах домов под прозрачным куполом встает задача оценки энергоэффективности таких сооружений. Прогноз влияния тех или иных конструктивных решений купольного сооружения на энергосбережение основывается на математическом моделировании теплообмена в многослойной системе, которое в этом случае становится более сложным, так как кроме переноса тепла теплопроводностью и конвекцией нужно учитывать радиационный теплообмен при наличии экрана с селективными оптическими свойствами [1–3].

В данной работе предложена относительно простая модель расчета характеристик теплопередачи через стенку здания с куполом, учитывающая парниковый эффект. Показано, что наличие полупрозрачного экрана из-за парникового эффекта значительно изменяет температуру стены здания под куполом и величину теплового потока, откуда следует важность учета таких факторов, как оптические свойства экрана, температура небесного свода и других климатических факторов при расчете теплового режима купольных систем.

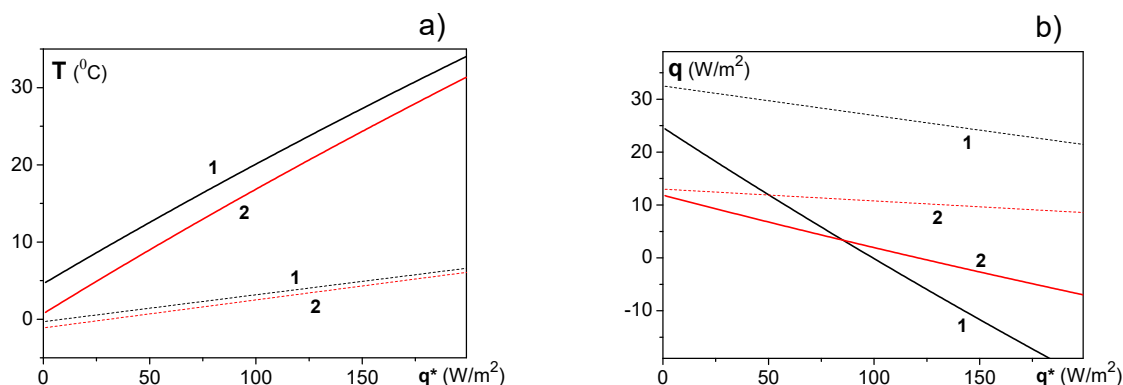


Рис. 1. Влияние термического сопротивления на температуру стенки (а) и тепловой поток в ней (б) в зависимости от падающего потока излучения.

$T_s = -100^\circ\text{C}$, $\varepsilon_1 = 0.9$, $\varepsilon_2 = 0.9$, $\varepsilon_3 = 0.9$. 1 – $R_1 = 0.5$, $R_2 = 1.5$, 2 – $R_1 = 1.5$, $R_2 = 0.5$

Литература

1. G. Van Straten, E. Van Willigenburg, R. Van Henten, and R. Van Oothghem. Optimal control of greenhouse cultivation / New York: Taylor and Francis, 2011.
2. M. Taki, Y. Ajabshirchi, S. F. Ranjbar, A. Rohani, and M. Matloobi. Modeling and experimental validation of heat transfer and energy consumption in an innovative greenhouse structure // Information Processing in Agriculture. – 2016. – Vol. 3, No 3. – Pp. 157-174.
3. A. Rasheed, J. W. Lee, and H. W. Lee. Development of a model to calculate the overall heat transfer coefficient of greenhouse covers // Spanish Journal of Agricultural Research. – 2017. – Vol. 15, issue 4, e0208, – 11 p.

КРАЕВЫЕ ЗАДАЧИ ЖЕВРЕ ДЛЯ ПАРАБОЛИЧЕСКИХ УРАВНЕНИЙ

Попова М. Н.

Северо-Восточный федеральный университет имени М. К. Аммосова
Якутск, Россия

В работе устанавливается разрешимость краевых задач для параболических уравнений с меняющимся направлением времени. Показано, что гёльдеровские классы решений зависят как от нецелого показателя Гёльдера, так и от коэффициентов матрицы условий склеивания при выполнении конечного количества необходимых и достаточных условий на входные данные задачи.

Solvability of boundary value problems for parabolic equations with changing time direction is established. It is shown that Hölder classes of solutions depend both on a noninteger Hölder exponent and the entries of the matrix of gluing conditions under finitely many necessary and sufficient conditions for the data of the problem.

Известно, что в краевых задачах для параболических уравнений с меняющимся направлением времени гладкость начальных и граничных данных не обеспечивают принадлежность решения пространствам Гёльдера, Соболева. Применение теории сингулярных уравнений дает возможность наряду с гладкостью данных задачи указать дополнительно необходимые и достаточные условия, обеспечивающие принадлежность решения таким пространствам.

В области $Q_T^- \cup Q_T^+$ рассматриваются параболические уравнения с меняющимся направлением времени

$$\operatorname{sgn} x \frac{\partial u}{\partial t} + (-1)^m \frac{\partial^{2m} u}{\partial x^{2m}} = f(x, t), m \in N.$$

Существование регулярного решения для уравнения

$$k(x, t) \frac{\partial u}{\partial t} - \Delta u + c(x, t)u = f(x, t)$$

без учета знакоопределенности функций $k(x, 0), k(x, T)$, рассматривалась в работе [1].

В настоящей работе изучаются краевые задачи для уравнений параболического типа с меняющимся направлением времени при $m \geq 1$ уточняются результаты работ [2,3] при $m = 2$ или $m = 3$, в частности, выписываются зависимости показателей гёльдеровских пространств от весовых функций склеивания для уравнений четвертого и шестого порядков.

Литература

1. Popova M.N. A Boundary Value Problem for a Second Order Forward-Backward Parabolic Equation // AIP Conference Proceedings. V.2328, Article ID 020005 (2021); doi.org/10.1063/5.0042875
2. Терсенов С.А. Параболические уравнения с меняющимся направлением времени. Новосибирск: Наука, 1985.
3. Попов С.В. Параболические уравнения сменяющимся направлением времени // Доклады Академии Наук. Математика, информатика, процессы управления, 2020. Т.91. С.82-85.

ГЛАДКИЕ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ЖЕВРЕ ДЛЯ УРАВНЕНИЯ СМЕШАННОГО ТИПА

Попов С. В.

Академия наук Республики Саха (Якутия),

Северо-Восточный федеральный университет имени М. К. Аммосова, Якутск, Россия

Изучаются краевые задачи Жевре для уравнений смешанного типа с помощью применения теории интегральных уравнений с ядром Коши. Известно, что гёльдеровские классы решений параболических уравнений переменного направления времени существенно зависят как от условий склеивания, так и от нецелого показателя пространства Гёльдера. Результатом работы является доказательство однозначной разрешимости для краевых задач Жевре для уравнений третьего, четвертого и шестого порядков.

The Gevrey boundary value problems are studied for mixed type equations. We rely on the theory of integral equations with the Cauchy kernel. As is known, the Hölder classes of solutions to forward-backward parabolic equations essentially depend on gluing conditions and a noninteger Hölder exponent of the space. The unique solvability of the Gevrey boundary value problems for equations of the third, fourth and sixth orders is proven.

В случае краевых задач для уравнений с меняющимся направлением времени, задач Жевре, гладкость начальных и граничных данных не обеспечивает повышение гладкости решения. Задачи Жевре для уравнений третьего порядка с кратными характеристиками рассматривались в работах Т. Д. Джураева [1], а для уравнений второго порядка, в основном модельных, рассматривались в работах М.С. Боуенди, П. Гривара, К.Д. Пагани, С.А. Терсенова, А. М. Нахушева, И.Е. Егорова, Н.В. Кислова, С. Г. Пяткова, А. И. Кожанова и других авторов. Задачи Жевре для таких уравнений, а также для общих операторно-дифференциальных уравнений, рассматривались в работах С. Г. Пяткова, В.И. Антипина (2014-2016) [2]. Краевые задачи для вырождающихся уравнений с кратными характеристиками рассматривались в работах [3].

Рассмотрены новые корректные краевые задачи для неклассических уравнений второго, третьего и четвертого порядков в гёльдеровских пространствах вида $H_{x\ t}^{p,p/3}$, $H_{x\ t}^{p,p/2n}$ при $n = 2,3$:

$$u_{xxx} + u_t = 0, \ x < 0, \ u_{xxxx} + u_t = 0, \ x > 0 \text{ или } u_{xxxxx} - u_t = 0, \ x > 0.$$

Применение теории сингулярных уравнений [4] дает возможность наряду с гладкостью данных задачи, указать дополнительно необходимые и достаточные условия, обеспечивающие принадлежность решения гёльдеровским пространствам [5].

Литература

1. Джураев Т. Д. Краевые задачи для уравнения смешанного и смешанно-составного типов. – Ташкент: ФАН, 1979.
2. Pyatkov S.G., Popov S.V., Antipin V.I. On Solvability of Boundary Value Problems for Kinetic Operator-Differential Equations // Integral Equations and Operator Theory. V.80 (2014). pp.557-580. DOI 10.1007/s00020-014-2172-7c.
3. Кожанов А. И., Зикиров О.С. Краевые задачи для дважды вырождающегося дифференциального уравнения с кратными характеристиками // Мат. заметки СВФУ. 2018. Т.25, №4. С.-44.
4. Солдатов А. П. Одномерные сингулярные операторы и краевые задачи теории функций. М.: Высшая школа. 1991. 266 с.
5. Попов С.В. Параболические уравнения сменяющимся направлением времени // Доклады Академии Наук. Математика, информатика, процессы управления, 2020. Т.91. С.82-85.

ОЦЕНКА КРАЕВЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ДЛЯ СТОЙКИ РЫХЛИТЕЛЯ КОГТИСТОЙ ФОРМЫ БУЛЬДОЗЕРА

Степанов В. Е.¹, Степанова К. В.²

¹ Северо-Восточный Федеральный университет имени М. К. Аммосова
Якутск, Россия

² Институт физико-технических проблем Севера им. В. П. Ларионова СО РАН
Якутск, Россия

На основе первых принципов теоретической механики [1] выполнена оценка снизу краевых напряжений (реальные напряжения больше получаемых значений из-за упрощающих предположений по выбору сечений) для стойки рыхлителя когтистой формы бульдозера Komatsu. Использованы гипотезы о линейном возрастании напряжения при продвижении к разрывной стороне стойки и выборе поперечных сечений, определяющих максимальные значения. Численные расчеты показали, что краевые разрывающие напряжения нелинейно возрастают по мере приближения поперечных сечений к вершине стойки.

On the basis of the first principles of theoretical mechanics [1], edge stresses reduced (real stresses are greater than the obtained values due to simplifying assumptions on the choice of sections) were estimated for the Komatsu bulldozer claw-shaped ripper tooth. We used hypotheses about a linear increase in stress when moving to the breaking side of the tooth and the choice of cross-sections that determine the maximum values. Calculations have shown that the edge breaking stresses increase nonlinearly as the cross-sections approach the top of the tooth.

Была изготовлена двухмерная калька боковой поверхности стойки в натуральную величину, на которой были изображены боковые сечения на разных расстояниях от вершины стойки. В статике известен принцип отвердевания, согласно которому равновесие нетвердого тела не нарушается при его отвердевании [1]. Таким образом, деформированную под действием силы тяги бульдозера стойку можно рассматривать как твердое тело в состоянии равновесия с силами реакции, приложенных в точке крепления рыхлителя. Силы реакции уравниваются с силами напряжения на каждом сечении стойки и таким образом порождают напряжения по всем сечениям до вершины стойки. В итоге равнодействующие силы напряжений на каждом сечении уравниваются как вращающие моменты с моментом поворота силы тяги относительно центра крайней точки сечения со сжимающим напряжением. Другая крайняя точка сечения является точкой максимального разрывающего напряжения, где возможно начало разрушения стойки. Здесь разрывающее напряжение равно нулю и далее предположим, что оно растет линейно до края сечения. Скорость возрастания напряжения определяется расчетным путем. Интеграл по площади сечения от функции напряжения дает полную силу, определяющую полный вращательный момент, уравниваемый моментом вращения силы тяги. Точка приложения равнодействующей определяется условием равенства двух интегралов по площадям до и после этой точки. Это условие позволяет вычислить скорость роста напряжения как функции от расстояния от неподвижной точки и тем самым найти функцию напряжения. На дальних расстояниях от вершины стойки ее боковые поверхности параллельны. Минимальную площадь поверхности сечения (и, соответственно, максимальное напряжение) можно получить по линии, перпендикулярной к боковой поверхности стойки. Рассчитаны напряжения для сечений стойки на различных расстояниях от вершины. Численными расчетами установлено, что напряжения разрыва возрастают нелинейно по мере приближения к вершине стойки. Следовательно, разрушение от разрывающих ее боковую

поверхность напряжений произойдет вблизи вершины стойки рыхлителя, что подтверждается практикой работы рыхлителя на производственных полигонах.

Литература

1. Бать М.И., Джанелидзе Г.Ю., Кельзон А. С. Теоретическая механика в примерах и задачах. Т.1, Изд. 5-е, переработанное/ Отв. ред. Г.Ю. Джанелидзе. – Москва: Изд-во Наука, 1967 – 512 с. с иллюстрациями.

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЙ МОДЕЛИ ПОПУЛЯЦИИ МИКРООРГАНИЗМОВ С НЕЛОКАЛЬНЫМ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕМ

Тимофеева Т. С., Винокурова С. С.
Северо-Восточный Федеральный университет им. М. К. Аммосова
Якутск, Россия

Начально-краевая задача для уравнения Колмогорова-Петровского-Пискунова, за границей называемое уравнением Фишера, является чрезвычайно интересной задачей для квазилинейного уравнения параболического типа. Она используется для математического описания различных процессов тепломассопереноса, теории горения, физики плазмы, биологии и экологии.

В последнее время разработаны различные обобщения данного уравнения. Мы рассмотрим одну математическую модель с нелокальным взаимодействием, описывающую пространственную динамику микробной популяции. Динамика популяционной плотности микроорганизмов определяется механизмами воспроизводства и конкурирующих потерь. Здесь формирование пространственно-неоднородных структур обусловлено нелокальной нелинейностью в определяющем уравнении.

Для решения начально-краевой задачи построена и численно реализована неявная разностная схема, реализуемая методом простых итераций. Проведена серия модельных численных расчетов для модели с начальным распределением плотности бактерии и функции конкурирующих потерь, заданными в виде финитных функций и распределения Гаусса. Приводятся и обсуждаются результаты численного исследования рассматриваемого процесса при различных входных данных и параметров пространственно-временной сетки.

ЧИСЛЕННАЯ ОЦЕНКА ПРОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРЕСНОГО ЛЬДА, АРМИРОВАННОГО БАЗАЛЬТОВЫМИ НАПОЛНИТЕЛЯМИ

Федоров А. Г.¹, Федорова Л. К.¹, Сыромятникова А. С.^{1, 2}
¹ Северо-Восточный федеральный университет им. М. К. Аммосова
Якутск, Россия
² Институт физико-технических проблем Севера им. В. П. Ларионова
Якутск, Россия

В рамках данной работы рассматривается математическая модель деформации армированного льда, предлагается модель оценки несущей способности пресного льда, армированного различными композитами.

Предлагается модель учитывающий степень влияния наполнителей в процесс сопротивления изгибу. Определены оптимальные значения для удовлетворительного согласования с экспериментальными данными.

We investigate, deformation of reinforced ice and offered a model for assessing the bearing capacity of fresh ice reinforced with various composites.

A model is proposed that takes into account the degree of influence of fillers in the process of bending resistance. The optimal values for satisfactory agreement with the experimental data have been determined.

Предельная величина груза, допускаемого при перемещении его по ледовой трассе, определяется для условий замерзших водных объектов, через которые она проходит. Значение предельных нагрузок зависит от толщины и прочности льда, которая в свою очередь зависит от скорости приложения нагрузки, структуры и температуры льда.

Проектирование, строительство и обустройство ледовых трасс производится в соответствии с двумя нормативными документами [1,2].

В соответствии с этими документами несущая способность (P) ледовых трасс может быть определена следующим образом:

$$P = \frac{h^2}{(11 \cdot n)^2} \quad (1)$$

где h – толщина льда (в см), n – коэффициент, учитывающий интенсивность движения (Табл. 1).

Таблица 1

N, авт/сут	<500	500-2000	>2000
n	1	1,1	1,25

Стоит отметить, что для всестороннего рассмотрения вопроса о грузоподъемности ледяного покрова при определенной его толщине, руководствоваться только формулой (1) недостаточно. Это обусловлено тем, что даже внутри одной страны не существуют универсальных методик расчета прочностных характеристик ледяных покровов и результаты расчетов ледовых нагрузок по различным методикам могут различаться, причем в несколько раз.

Немаловажным направлением исследований, является задача увеличения прочностных (несущей способности) характеристик ледяных покровов. В настоящее время, для усиления прочностных характеристик льда используются композиционные материалы на основе льда (КМЛ), содержащие дополнительные компоненты (фазы). Так, например, наиболее часто применяемыми способами увеличения прочностных характеристик льда являются применение химических модификаторов и армирование. Но для выявления оптимальных характеристик прочностных характеристик чистого льда/КМЛ требуется большой объем экспериментальной работы. Более того, критическим моментом является понимание оптимальных составов КМЛ и нацеленный поиск эффективных материалов, которое невозможно провести без теоретических расчетов прочностных свойств. Теоретические расчеты приближенные к эксперименту, в настоящее время, выполняются исключительно численным моделированием.

В рамках данной работы предлагается математическая модель оценки несущей способности пресного льда, армированного различными композитами.

В связи с тем, что лед относится к хрупким материалам, для расчета процесса деформации конструкции была применена модель William-Warnke [3]. Расчеты с данной моделью были для пресной ледяной балки были сделаны в работе [4]. В модели учтен параметр, учитывающий степень влияния наполнителей в процесс сопротивления изгибу. Определены оптимальные значения для удовлетворительного согласования с экспериментальными данными.

Результаты исследования способствуют оценке и усовершенствованию методов разработки оптимальных по составу модификаторов для действующих ледовых поверхностей, имеющих практическую значимость. Также, способствует повышению достоверности метрологических технологий при строительстве ледяных сооружений в криолитозоне России.

Литература

1. ВСН 137-889 «Проектирование, строительство и содержание зимних автомобильных дорог в условиях Сибири и Северо-Востока СССР»;
2. ОДН 218.010-98 «Инструкция по проектированию, строительству и эксплуатации ледовых переправ».
3. Willam K. J., Warnke E. P. Constitutive Model for the Triaxial Behavior of Concrete // Colloquium on Concrete Structures Subjected to Triaxial Stresses, Instituto Speerimentale Modelie Structure (ISMES). Bergamo, May 17–18, 1974, vol. 19. ETH Zurich, 1975, pp. 1–30.
4. Lyubov K. Fedorova and Aytalina S. Syromyatnikova. Mathematical modeling of the strength properties of ice reinforced with basaltic fillers for use in Arctic // AIP Conference Proceedings 2328, 050011 (2021).

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ФРЕЙМВОРКА FLUTTER ДЛЯ СОЗДАНИЯ ПРОЕКТА ЭКОДВИЖЕНИЯ

Худаев Д. Д., Федотова М. А.

Северо-Восточный федеральный университет им. М. К. Аммосова, Якутск, Россия

В работе представлен один из вариантов решения проблемы загрязнения окружающей среды путем использования современных инструментов разработки приложений. Разработано приложение для ОС Android и iOS с системой оповещения и экологического просвещения населения с применением информационно-коммуникационных технологий.

В настоящее время мусор является мировой проблемой и может вызвать глобальную экологическую катастрофу. Выделяются 3 основные проблемы, усугубляющие загрязнение городской среды: 1) фрагментация экологических сообществ; 2) экологическое невежество; 3) относительная пассивность населения. Наиболее актуальными инструментами для продвижения или решения указанных проблем могут явиться мобильные приложения. В связи с этим, целью данной работы явилась разработка социальной платформы для решения проблемы загрязнения окружающей среды с использованием фреймворка Flutter. За счёт широких возможностей в реализации бизнес-логики и высокой производительности эта платформа представляет каркас, который хорошо подходит для создания сложных сайтов, бизнес-приложений и веб-сервисов. И, с другой стороны, разработка приложения на фреймворке (в отличие от самописных решений) позволяет добиться простоты сопровождаемости проекта, не теряя гибкости в плане функционала с возможностями индивидуальной реализации многих функций.

Поиск аналогов среди существующих приложений показал, что их немного. Были выявлены такие приложения как «Trash Out» (Словакия), «Наша природа» (Россия) и «Зеленая карта» (Белоруссия). Перед началом разработки аналоги были проанализированы по таким критериям, как основная идея приложения, способы уменьшения нагрузки на окружающую среду, рейтинг в Google Play, количество загрузок, совместимость с версиями ОС Android. Обзор показал, что основная идея и методы снижения экологической нагрузки практически одинакова для всех приложений, продукты имеют ограниченную и неясную функциональность. 2 из 3 приложений не поддерживают английский язык, что недостаточно для экологического просвещения населения. На основе вышеуказанных критериев сформулированы следующие требования к разрабатываемому экологическому приложению: 1) простота и ясность приложения на русском и английском языках; 2) возможность зафиксировать, сообщить или решить проблему; 3) экологическое просвещение населения.

Выбором для реализации проекта стал кроссплатформенный подход, который позволяет совершать разработку для ОС Android и iOS. Наилучшим инструментом для этого стал фреймворк Flutter разработанный компанией Google [1]. Данный подход

имеет заметное преимущество в скорости и стоимости разработки [2]. Для тестирования используется виртуальное устройство Android (AVD) от Android Studio [3]. Разрабатываемое приложение имеет 5 основных вкладок: новости; карта; камера; библиотека; профиль (рис. 1, а-г).

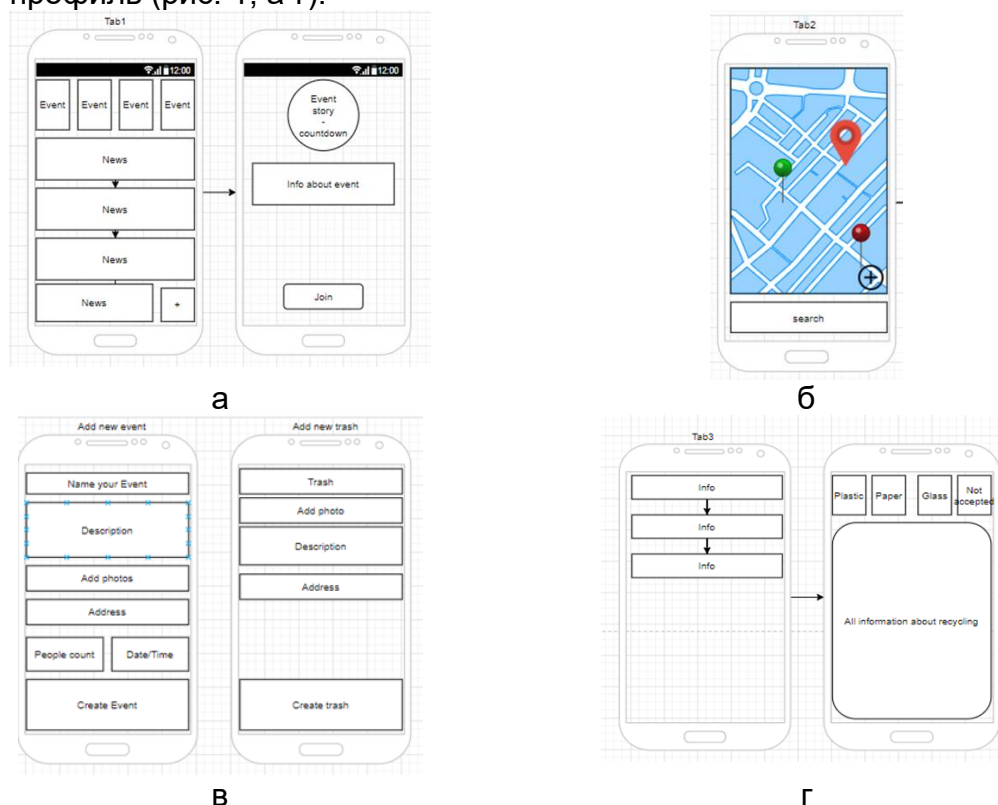


Рис. 1. Вкладки разрабатываемого приложения
новости (а), карта (б), форма заявки (в), библиотека (г)

Страница новостей состоит из окон событий и информационной ленты. При нажатии на «Событие» открывается страница с информацией и добавляется кнопка присоединения к определенному экологическому событию. Вкладка 2 («Карта») содержит карту города, на которой красным цветом отмечается, например, несанкционированный мусор, события отмечены зеленым цветом, точки приема вторичного сырья отмечены бордовым. При нажатии кнопки «+» открывается форма заявки, где подробно пользователь указывает адрес и описание проблемы. Вкладка 3 («Камера») при наведении камеры на маркировку приложение укажет ссылку на источник, где будет подробно описана подготовка сортировки мусора. Вкладка 4 содержит список информации о подготовке и сортировке мусора. Создана регистрация пользователей через Google. В качестве базы данных планируется использовать Firebase [4].

Приложение разрабатывается в соответствии с вышеуказанными требованиями. В настоящее время проводится работа над разработкой клиентской стороны. Расположение элементов интерфейса определяется UX (опытом работы с интерфейсом). Визуальная составляющая дополняется цветовой гаммой в стиле экологического дизайна. Разрабатываемое приложение будет доступно для использования широким кругом населения и будет способно воспитывать соответствующее отношение к тем экологическим угрозам, которые воспринимались ранее как обыденные непримечательные проблемы.

Литература

1. Официальный сайт Flutter – URL: <https://flutter.dev/> – (дата доступа: 27.04.2021) – Текст: электронный.
2. EGO Creative Innovations – EGO занимает первое место в рейтинге компаний по разработке мобильных приложений по Clutch.co.: официальный сайт – URL: <https://www.ego-cms.com/post/5-major-differences-between-ios-and-android-app-development> – (дата доступа: 27.04.2021) – Текст: электронный.

3. Официальный сайт Envato. – URL: <https://code.tutsplus.com/tutorials/the-android-sdk-tutorial--cms-34623> – (дата доступа: 27.04.2021). – Текст: электронный.
4. Официальный сайт Firebase – URL: <https://firebase.google.com/> – (дата доступа: 27.04.2021) – Текст: электронный.

ЭЛЕКТРОННЫЕ СВОЙСТВА СТРУКТУРЫ ГРАФЕН-СИЛИЦЕН

Шарин Е. П., Муксунов Н. Я.

Северо-Восточный федеральный университет им. М. К. Аммосова
Якутск, Россия

Подобно графену силицен представляет собой монослой атомов кремния в гексагональной решетке, обладающий такими же уникальными свойствами как графен. Однако силицена изготовление остается проблемой из-за достаточно быстрого окисления силицена на воздухе.

Ван-дер-ваальсовы структуры, полученные путем наложения слоев изолированных двумерных атомных кристаллов, таких как графен (GE) и силицен (SE) обеспечивают стабильность силицена, что открывает возможности для широкого применения силицена для разработки будущих multifunctional устройств. В настоящей работе в рамках теории функционала плотности изучены электронные свойства структуры графен-силицен.

Silicene, a monolayer of hexagonally arranged Si atoms, has attracted a lot of attention in recent years due to its outstanding physical and chemical properties. Due to the similarity of the lattice structures, silicene presents essentially the same electronic properties as graphene.

Van der Waals structures obtained by stacking layers of isolated two-dimensional atomic crystals such as graphene and silicene provide the stability of silicene, which opens up opportunities for widespread use of silicene for the development of future multifunctional devices. In the present work, within the framework of the density functional theory, the electronic properties of the graphene-silicene structure are studied

Двумерные структуры на основе графена, особенно, вертикальные структуры рассматриваются в настоящее время как основное направление развития тонкопленочной (графеновой) электроники [1,2]. Структура графен-силицен, которую предстоит исследовать в этой работе, представляет собой пример структуры сверхрешетки, уникальной как по толщине слоя, по химической связи, так и по электронным свойствам. Известно, что отдельно взятые слои графена и силицена сходные структурные и электронные свойства и используя преимущества этих уникальных свойств можно создать структуры, которые откроют новые возможности в новой области наноэлектроники. Актуальность работы подчеркивается необходимостью нахождения материалов, способных предоставить современной микроэлектронике более обширный функционал.

В данной работе на основе метода функционала плотности произведен расчет электронного спектра простейшего случая, бислоя графен-силицен, которые имеют одинаковую кристаллическую структуру. В качестве инструмента *ab initio* расчетов использовался программный пакет Quantum Espresso, предназначенный для моделирования атомно-молекулярных и электронно-ядерных систем методами квантовой механики и молекулярной динамики. Взаимодействие между ионами и электронами моделируемой системы описывается посредством псевдопотенциального подхода и метода присоединенных плоских волн. *Ab initio* моделирование проводилось в рамках теории функционала плотности с использованием обобщенного градиентного приближения (GGA). Для ускорения сходимости в расчетах выбрана величина энергии «об-

резания» $E_{cut}=40$ Ry. Разбиение обратного пространства на сетку $7 \times 7 \times 1$ осуществлялось посредством использования метода Монхорста-Пака. Во избежание взаимодействия между слоями расстояние между ними устанавливалось равным $20 \text{ \AA}$.

Литература

1. Novoselov K.S., Fal'ko V.I., Colombo L., Gellert P.R., Schwab M.G., Kim K. // Roadmap for graphene Nature. – 2012. – 192. – PP. 192-200.
2. Новоселов К.С. // Графен: материалы Флатландии УФН. – 2011. – 181. – СС. 1299-1311.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОБРАЗОВАНИЯ ГАЗОГИДРАТА В ЗОНАЛЬНО-НЕОДНОРОДНОМ ПОРИСТОМ ПЛАСТЕ

Мусакаев Н. Г., Бородин С. Л., Косяков В. П.

Тюменский филиал Института теоретической и прикладной механики
им. С. А. Христиановича СО РАН
Тюмень, Россия

В работе представлена математическая модель процесса образования газогидрата в зонально-неоднородном пористом пласте. Описана комбинация численных методов для решения уравнений математической модели. Приведены и проанализированы результаты численных экспериментов при различных комбинациях начальных параметров в пласте и параметров закачки газа.

В последние десятилетия существует большой интерес к газовым гидратам, который во многом связан с возможностью их практического использования [1]. Например, возможно хранение газа в пористых коллекторах в составе газового гидрата, эффективность такого подхода обусловлена достаточно большим количеством газа в малом объеме [2, 3]. Данная тематика, в частности, исследована Эдуардом Антоновичем Бондаревым в его работах с коллегами [2, 4], в которых рассматривается процесс нагнетания природного газа в водоносный пласт с последующим образованием в этом пласте газового гидрата.

Наше исследование также посвящено этой задаче. Особенностью является то, что процесс рассмотрен в осесимметричной постановке в цилиндрических координатах (ось r и вертикальная ось z) для случая зонально-неоднородного пласта. Постановка задачи следующая – пусть имеется пористый пласт, заполненный в начальном состоянии метаном и водой или льдом, система находится в термодинамическом равновесии. Через скважину, которая вскрывает пласт на всю высоту, происходит закачка метана с давлением и температурой соответствующим условиям образования газового гидрата.

В работе рассматриваются особенности образования гидрата метана в пористой среде при изначальном наличии свободной воды (с учетом ее возможной фильтрации). При этом принимается модель зонально-неоднородного пористого пласта, состоящего из двух зон с различной проницаемостью (высоко- и низкопроницаемая зона). Приняты следующие допущения: скелет пористой среды и газовый гидрат несжимаемы и неподвижны; процесс однотемпературный, т.е. в некотором бесконечно малом объеме температуры пористой среды и насыщающих веществ (газа, воды и гидрата) совпадают; массовая концентрация газа G в гидрате постоянна; фазовые переходы происходят в равновесном режиме [5].

В работе в радиальной осесимметричной постановке, учитывая принятые допущения, записаны основные уравнения, описывающие изучаемый процесс [2, 5, 6]. Численные эксперименты по изучению особенностей образования гидрата в зонально-неоднородной пористой среде были выполнены с использованием расчетной методики, приведенной в работе [7], дополненной уравнением для движения воды и

учетом зон пласта с различной проницаемостью. Расчеты проведены при различных комбинациях начальных параметров в пласте и параметров закачки газа. Показано, что в зависимости от давления нагнетания в пласт газа, также как и для случая однородной пористой среды, образование гидрата метана происходит либо на фронтальной поверхности, либо в протяженной области пласта.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-29-10023.

Литература

1. Кузнецов Ф.А., Истомин В.А., Родионова Т.В. Газовые гидраты: исторический экскурс, современное состояние, перспективы исследований // Российский химический журнал. – 2003. – Т. 47, № 3. – С. 5–18.
2. Bondarev E.A., Rozhin I.I., Popov V.V., Argunova K.K. Underground Storage of Natural Gas in Hydrate State: Primary Injection Stage // Journal of Engineering Thermophysics. – 2018. – Vol. 27, No. 2. – Pp. 221–231. DOI: 10.1134/S181023281802008X
3. Veluswamy H.P., Kumar A., Seo Y., Lee J.D., Linga P. A review of solidified natural gas (SNG) technology for gas storage via clathrate hydrates // Applied Energy. – 2018. – Vol. 216. – Pp. 262–285. DOI: 10.1016/j.apenergy.2018.02.059
4. Бондарев Э.А., Рожин И.И., Попов В.В., Аргунова К.К. Оценка возможности подземного хранения гидратов природного газа в зоне многолетней мерзлоты // Криосфера Земли. – 2015. – Т. 19, № 4. – С. 64–74.
5. Шагапов В.Ш., Мусакаев Н.Г. Динамика образования и разложения гидратов в системах добычи, транспортировки и хранения газа. – М.: Наука, 2016. – 240 с.
6. Нигматулин Р.И. Динамика многофазных сред. М.: Наука, 1987.
7. Musakaev N.G., Borodin S.L., Gubaidullin A.A. Methodology for the Numerical Study of the Methane Hydrate Formation During Gas Injection into a Porous Medium // Lobachevskii Journal of Mathematics. – 2020. – Vol. 41, No. 7. – Pp. 1272–1277. DOI: 10.1134/S199508022007032X

Авторы

Алексеев А. А.
Андреев А. С.
Аргунова К. К.
Афанасьев Д. Е.
Белослудов В. Р.
Бескрованов В. В.
Божко Ю. Ю.
Большев К. Н.
Бородин К. А.
Варламов С. П.
Васильев П. Ф.
Виноградова С. С.
Власов В. А.
Гатапова Е. Я.
Гималтдинов И. К.
Глязнецова Ю. С.
Граур И. А.
Григорьев Ю. М.
Давлетшина М. Р.
Данилов Н. Д.
Драчук А. О.
Ерёмин И. И.
Ефимов Н. К.
Ефремов В. Н.
Жданов Р. К.
Заболотник П. С.
Заводовский А. Г.
Заричняк Ю. П.
Зуева И. Н.
Иванов Г. И.
Ионкин И. Л.
Истягина Е. Б.
Калачева Л. П.
Капитонова В. С.
Катаев А. И.
Кириллин А. Р.
Коваленко А. Н.
Кораблев В. А.
Кравцова О. Н.
Кропачев Д. Ю.
Кулагин В. А.
Лепов В. В.
Лифшиц С. Х.
Лукин Е. С.
Мадыгулов М. Ш.
Марова А. А.
Мендгазиев Р. И.
Минкин Д. А.
Миронова И. Б.
Мордовской С. Д.
Мусакаев Н. Г.

Алексеев Р. З.
Аргунова А. А.
Архангельская Е. А.
Ачикасова В. С.
Берендеева О. Е.
Бикбулатова Э. М.
Большев К. Н.
Бородин С. Л.
Валиуллин Л. Р.
Варфоломеев М. А.
Великин С. А.
Винокуров В. А.
Володин О. А.
Гец К. В.
Гималтдинов Л. К.
Горбунова А. Ю.
Григорьев А. В.
Гриша Б. Г.
Давыдов Г. И.
Дас М. К.
Егорова А. Д.
Ерофеевская Л. А.
Ефимов С. Е.
Ефремов П. В.
Жостков Р. А.
Заболотник С. И.
Зарипова Ю. Ф.
Захаров В. Е.
Иванов В. А.
Иванова И. К.
Истомин В. А.
Каймонов М. В.
Калиничева С. В.
Капитонова Т. А.
Кацурба М. В.
Кобылин В. П.
Константинова Т. И.
Косяков В. П.
Красильников Д. А.
Кузьмин С. А.
Курилко А. С.
Ли-Фир-Су Р. П.
Лонгинова В. Я.
Лукьянов Г. Н.
Малышев А. В.
Манаков А. Ю.
Матвеева О. И.
Местников Н. П.
Минова Е. Н.
Молокитина Н. С.
Некрасов А. С.

Насыров А. А.	Нестеров А. Н.
Неронов Р. В.	Николаев И. Н.
Николаев А. И.	Павельев Р. С.
Николаева Н. А.	Павлов Н. В.
Павленко А. Н.	Пермяков П. П.
Павлов Н. Н.	Пилипенко Н. П.
Печеркин Н. И.	Плетнева К. А.
Пилипенко Н. В.	Попенко Ф. Е.
Поденко Л. С.	Попов В. И.
Портнягин А. С.	Проскурин Ю. В.
Протодьяконова Н. А.	Прохоров Д. В.
Пугач В. Н.	Радзюк А. Ю.
Рассади́на А. А.	Рахлеев А. М.
Решетников А. М.	Рогов В. В.
Родионов А. С.	Рожин И. И.
Романова Е. К.	Росляков П. В.
Савви́нова Н. А.	Семенов А. П.
Семенов М. Е.	Семенов С. О.
Семенова Н. П.	Сергеева Д. В.
Ситдикова Л. Ф.	Скачков Ю. Б.
Скрябин П. Н.	Собисевич А. Л.
Степанов А. А.	Степанов А. В.
Столповский М. В.	Стопорев А. С.
Страшников А. В.	Стручкова Г. П.
Суетнова Е. И.	Сыромятникова А. С.
Такайшвили Л. Н.	Таппырова Н. И.
Тарасов И. И.	Третьяков Э. С.
Унжаков А. С.	Фархадян А.
Федоров М. В.	Халявин А. М.
Хасанов М. К.	Хлебников В. Н.
Ходунков В. П.	Хохолов Ю. А.
Хоютанов А. М.	Цеева А. Н.
Чайникова А. А.	Чалая О. Н.
Чжан Р. В.	Чиглинцев И. А.
Чиглинцева А. С.	Шадрин В. Ю.
Шарков А. В.	Ярковой В. В.
Ayaj Ahamad Ansari	Hu R.
Khandekar S.	Korablev V. A.
Laptev Yu. A.	Malay K Das
Malay Kumar Das	Minkin D. A.
Mitropov V. V.	Pradipta K Panigrahi
Pradipta Kumar Panigrahi	Rahul Yadav
Randeep Ravesh	Sahu G.
Sameer Khandekar	Sharkov A. V.
Sharkov A. V.	Tsvetkov O. B.

Оформление и верстка *Ю. Болдырева*

Дата подписания к использованию: 28.07.2021

Объем издания: 25,9 Мб. Комплектация: 1 электрон. опт. диск (CD-R)

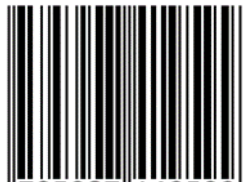
Тираж 8 экз.



Издательство АНО ДПО «Межрегиональный центр
инновационных технологий в образовании»
610047, г. Киров, ул. Свердлова, 32а, пом. 1003
Тел.: 8(8332) 32-47-48
<https://mcito.ru/publishing>; E-mail: book@mcito.ru



ISBN 978-5-907419-59-9



9 785907 419599