

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
МИНИСТЕРСТВО ЭНЕРГЕТИКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
МИНИСТЕРСТВО ПРОМЫШЛЕННОСТИ И ТОРГОВЛИ РЕСПУБЛИКИ ТАТАРСТАН
ФГБОУ ВПО «КАЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»
ИНСТИТУТ ТЕПЛОФИЗИКИ ИМ. С.С. КУТАТЕЛАДЗЕ СО РАН

IX СЕМИНАР ВУЗОВ ПО ТЕПЛОФИЗИКЕ И ЭНЕРГЕТИКЕ

МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ

21–24 октября 2015 года
г. Казань, Россия

Сборник материалов докладов

В четырех томах

Том IV

*Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда
фундаментальных исследований
Соглашение № 15-08-20837/15 от 31.07.2015*

Казань 2015

УДК 620.9
ББК 31
С306

С306 IX Семинар ВУЗов по теплофизике и энергетике: сборник материалов докладов / в 4 т. Т. IV. – Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2015. – 240 с.

ISBN 978-5-89873-443-5

ISBN 978-5-89873-442-8

В первом томе публикуются материалы пленарных докладов и секции 1 «Теплофизика» по направлениям: тепломассообмен, гидрогазодинамика, горение, моделирование.

Во втором томе – секция 2 «Теплоэнергетика» по направлениям: развитие парогазовой и угольной энергетики, возобновляемая энергетика, энерго-сбережение, экология.

В третьем томе – секция 3 «Тепловые электрические станции» по направлениям: инновации, исследования, автоматизация.

В четвертом томе публикуются материалы секции 4 «Энергоэффективность, энергосбережение и импортозамещение в топливно-энергетическом комплексе» и секции 5 «Круглый стол. Системы теплоснабжения».

Предназначен для научных работников, аспирантов и специалистов, работающих в области энергетики, а также для студентов вузов энергетического профиля.

УДК 620.9

ББК 31

*Материалы докладов публикуются в авторской редакции.
Ответственность за содержание тезисов возлагается на авторов*

ISBN 978-5-89873-442-8

© Казанский государственный
энергетический ун-т, 2015

СЕКЦИЯ 4
ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ, ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ
И ИМПОРТОЗАМЕЩЕНИЕ В ТОПЛИВНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКОМ
КОМПЛЕКСЕ

Председатель: Лаптев Анатолий Григорьевич

Сопредседатель: Ковальногов Николай Николаевич

Секретарь: Дремичева Елена Сергеевна

УДК 66.011

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ХАОТИЧНОГО НАСАДОЧНОГО СЛОЯ
В КАЧЕСТВЕ ИНТЕНСИФИКАТОРА ПРОВОДИМЫХ ПРОЦЕССОВ

А.Г. ЛАПТЕВ*, О.Г. ДУДАРОВСКАЯ*, Т.М. ФАРАХОВ**

*ФГБОУ ВПО «Казанский государственный энергетический университет»,
г. Казань

**ООО Инженерно-внедренческий центр «Инжехим», г. Казань

Аннотация. Для повышения эффективности технологических процессов в энергетике и в нефтехимии в качестве интенсификатора используется хаотичный насадочный слой.

Ключевые слова: насадочный слой, повышение эффективности, статический смеситель, жидкостной экстрактор, теплообмен, массообмен.

Для повышения эффективности технологических процессов в энергетике и нефтехимии возникает необходимость внедрения эффективных методов интенсификации как в действующие аппараты, так и во вновь проектируемые.

Прогресс в усовершенствовании конструкций технологической аппаратуры тесно связан с проблемой интенсификации процесса, решение которой дает возможность повысить технико-экономические показатели эксплуатируемых установок и создает условия для разработки новых высокоэффективных аппаратов.

Многие процессы в энергетике сопровождаются процессом теплообмена, например процесс смешения котельного топлива с присадками, а также фильтрация жидкости, проходящая через зернистый слой, смешение жидкостей в проточных насадочных смесителях с насадками.

Для интенсификации теплообмена используются различные методы: закрутка потока, турбулизация потока, оребрение поверхности, выступы и углубления различной формы и т.д. Одним из эффективных и технологичных в исполнении методов интенсификации теплообмена, особенно при режимах работы с ламинарными потоками, является применение объемного интенсификатора – хаотичного насадочного слоя, который позволяет турбулизировать в канале поток и увеличить коэффициент теплоотдачи. Динамика потока в трубах, оборудованных интенсификатором, существенно отличается по сравнению с динамикой потока в полых трубах (без применения интенсификаторов).

На рис. 1 представлен теплообменник типа «труба в трубе» (один из вариантов применения хаотичного насадочного слоя в качестве интенсификатора).

Наибольший эффект использования хаотичной насадки достигается при ламинарном движении среды в канале, т.к. насадка вызывает переход от ламинарного течения к интенсивному турбулентному. Такой способ интенсификации может использоваться когда нет существенных ограничений по перепаду давления и среда не содержит механических загрязнений.

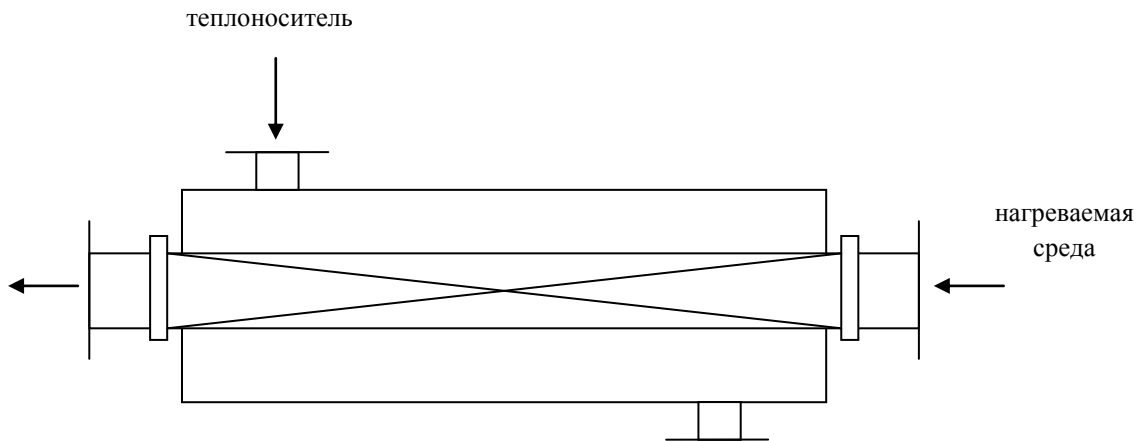


Рис. 1. Теплообменник типа «труба в трубе»

Использование в качестве объемного интенсификатора – хаотичного насадочного слоя позволяет повысить эффективность процесса теплообмена, сократить площади помещений, сократить объем и количество и, вследствие этого, также вес теплообменников, снизить затраты на сооружение, транспортировку и установку.

Объемный интенсификатор можно внедрять при реконструкции и усовершенствовании уже существующих теплообменников, а также на новых установках.

Кроме повышения эффективности теплообмена применение в качестве интенсификатора хаотичного насадочного слоя также обеспечивает интенсивное смешение сред в проточных статических смесителях [1].

Статические смесители широко применяются для эффективного проведения процессов смешения, таких как приготовлений смесей, эмульсий, для ввода флокулянтов в суспензии, кислот в жидкости для нейтрализации, в установках для ввода присадок в топливо, улучшающих его качество, для проведения массообменных процессов (растворения, экстракции). В таких смесителях перемешивание происходит без участия подвижных механических устройств, они устанавливаются на трубопроводах.

Важнейшими преимуществами статических смесителей являются их исключительная надежность, простота монтажа, компактность, позволяющая встраивать их в существующие технологические линии с минимальными затратами.

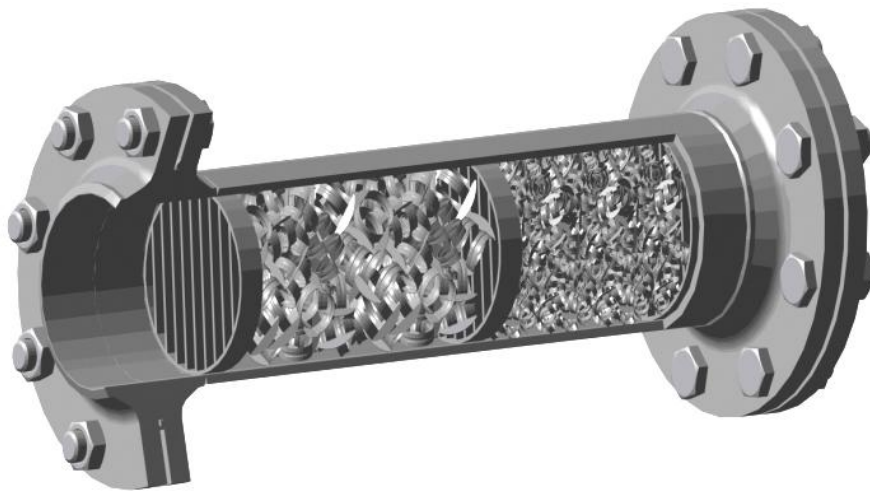


Рис. 2. Статический смеситель с неупорядоченной насадкой «Инжехим»

Широкое применение нашли статические смесители насадочного типа. На рисунке 2 представлен статический смеситель насадочного типа.

Неупорядоченный насадочный слой, состоящий из мелких элементов, обладает достаточно большой удельной поверхностью ($a_v \sim 200-600 \text{ м}^2/\text{м}^3$), распределенной хаотично в объеме. Равномерное распределение дисперсной фазы вблизи каждого элемента обеспечит практически однородную концентрацию частиц в целом по всему слою.

Из-за градиента скорости сплошной среды у поверхности каждого элемента появляется поток импульса и поток массы частиц. Так как элементы насадок распределены хаотично, то эти потоки способствуют эффективному перемешиванию сред по объему смесителя [2].

Статические смесители насадочного типа в энергетике могут использоваться при вводе присадок в котельное топливо; для смешения двух жидкостей; для растворения мелкодисперсных частиц, а также для проведения жидкостной экстракции.

В химической технологии статические смесители могут использоваться в качестве прямоточных жидкофазных экстракторов [3].

Широко применяются в промышленности экстракторы смесительно-отстойного типа, т.к. имеют высокий к.п.д, просты по устройству и их работа легко автоматизируется. Экстракторы такого типа содержат смесительную и отстойную камеру, в смесительной камере устанавливается устройство для диспергирования и смешения фаз, в качестве смесительного устройства может использоваться проточный статический смеситель насадочного типа.

Контактирующие фазы, поступая в смесительную зону, подвергаются интенсивному воздействию, проходя через насадочный слой, который позволяет увеличить поверхность соприкосновения фаз. Основное достоинство насадок является низкое гидравлическое сопротивление при высокой эффективности массообмена. Получаемая эффективность является вполне достаточной в качестве первой ступени очистки методом жидкостной экстракции. Для повышения эффективности массопередачи до 100 % процесс извлечения можно проводить в двух или трех последовательных прямоточных каналах с подачей свежей порции экстрагента перед каждым насадочным слоем.

Такой процесс позволяет повысить эффективность извлечения компонентов за счет увеличения коэффициентов массоотдачи при относительно простом аппаратном оформлении.

Таким образом, применение хаотичного насадочного слоя в качестве интенсификатора позволяет повысить эффективность теплообменных аппаратов, а также внедрить данный интенсификатор как в действующие аппараты, так и во вновь проектируемые.

Список литературы

1. Лаптев А.Г., Фарахов Т.М., Дударовская О.Г. Математическая модель перемешивания жидкостей с дисперсной фазой при ламинарном и турбулентном режимах в насадочном проточном смесителе //

Теоретические основы химической технологии. – 2015. – № 1. – Т. 49. – С. 23–32.

2. Клинова Л.П., Сосновская Н.Б., Дьяконов С.Г. Математическое моделирование процесса растворения твердых частиц в аппаратах с перемещающимися устройствами // Массообменные процессы и аппараты химической технологии: Межвуз. тематич. Сб. науч. Тр. Казань: КХТИ. 1987. – С. 114–125.

3. Лаптев А.Г., Фарахов Т.М., Дударовская О.Г. Модель массоотдачи при жидкостной экстракции в турбулентном прямотоке // Инженерно-физический журнал. – 2015. – № 1. – Т.88. – С. 203–210.

THE USE OF CHAOTIC PACKED LAYER AS INTENSIFIER OF ONGOING PROCESSES

A.G. LAPTEV*, O.G. DUDAROVSKAYA*, T.M. FARAHOV**

*FSBEI NPE «Kazan power-engineering university», Kazan

**Engineering innovation center «INZHEKHIM», Kazan

Annotation. To improve the efficiency of processes in the energy and petrochemicals used as intensifier chaotic packed bed.

Key letters: packed bed, increased efficiency, a static mixer, a liquid extractor, heat transfer, mass transfer.

УДК 66.048.3.001.63

ТЕПЛОИНТЕГРАЦИЯ В СИСТЕМАХ ПРОСТЫХ РЕКТИФИКАЦИОННЫХ КОЛОНН НА ОСНОВЕ МОДИФИКАЦИИ ЗАДАЧИ О НАЗНАЧЕНИЯХ

И.И. ЕМЕЛЬЯНОВ, Н.Н. ЗИЯТДИНОВ, Г.М. ОСТРОВСКИЙ
ФГБОУ ВПО «Казанский национальный исследовательский
технологический университет», г. Казань

Аннотация. Рассматриваются задача рекуперации тепла при синтезе оптимальных систем простых ректификационных колонн и способ ее решения, основанный на предлагаемой модифицированной постановке задачи о назначениях.

Ключевые слова: тепловая интеграция, система ректификационных колонн, оптимальный синтез, задача о назначениях.

Промышленные процессы ректификации являются наиболее энергоемкими в химической технологии. Доля энергетических затрат на ректификацию в общей структуре затрат нефтехимических производств достигает 30 % [1]. Отсюда следует актуальность поиска путей снижения энергозатрат действующих и проектируемых систем ректификационных колонн (СРК). Из множества существующих подходов к энергосбережению [1], мы будем рассматривать подход, связанный с тепловой интеграцией материальных и тепловых потоков СРК [1, 2, 3, 4]. Фактически СРК с тепловой интеграцией можно представить состоящей из двух систем: собственно системы СРК без теплоинтеграции и системы теплообмена. В работах [5, 6] предложены методы к синтезу и проектированию оптимальных СРК без тепловой интеграции. Наибольший интерес с точки зрения алгоритмизации задачи теплоинтеграции на наш взгляд представляет работа [4]. Однако она не в полной мере учитывает особенности возможных источников и стоков тепла при теплоинтеграции потоков в СРК. В настоящей статье мы остановимся на развитии и алгоритмизации идеи, изложенной нами в [7]. В ней для решения задачи тепловой интеграции СРК предложено использовать задачу о назначениях [8].

Предположим мы построили оптимальную СРК без учёта рекуперации тепла. В каждой ректификационной колонне мы будем знать количество тепла ΔQ_i^h , которое необходимо отобрать от i -го «горячего»

потока S_i^h сверху РК, чтобы его конденсировать и количество тепла ΔQ_j^c , которое необходимо передать j -му «холодному» потоку S_j^c , рециркулируемого в кубе РК, для его испарения. К «холодным» потокам добавим потоки питания колонн, которые необходимо подогреть до температуры $T_j^{c,out}$, к «горячим» – сырьевые потоки колонн, которые будем охлаждать до температуры $T_i^{h,out}$. Помимо этого, в качестве источников тепловой энергии в СРК могут быть использованы и выходные потоки системы, идущие на утилизацию.

Пусть число «горячих» («холодных») потоков равно M . Поскольку мы от «горячих» потоков должны отбирать тепло, а в «холодные» добавлять, то появляется возможность использовать тепло «горячих» потоков для нагревания «холодных» (использовать «холодные» потоки для отбора тепла от «горячих» потоков). Необходимо найти такую систему теплообмена, в которой сумма капитальных и энергетических затрат Φ будет минимальна.

Для каждой пары i -го «горячего» и j -го «холодного» потоков возможно несколько структурных решений организации теплообмена (рис. 1) – элементарных блоков системы теплообмена (ЭБСТ).

Теплообмен с рекуперацией тепла целесообразен при очевидном условии $T_j^{c,in} \leq T_i^{h,in} - \Delta T_{ij}$ с учетом минимально возможной разности температур ΔT_{ij} . Если $T_j^{c,in} > T_i^{h,in} - \Delta T_{ij}$, то теплообмен между i -м горячим и j -м холодным потоками нецелесообразен и необходимы их автономные охлаждение и нагревание соответственно через ЭБСТ 1.

Если $T_j^{c,in} \leq T_i^{h,in} - \Delta T_{ij}$, $T_i^{h,in} - T_j^{c,out} < \Delta T_{ij}$ и/или $T_i^{h,out} - T_j^{c,in} < \Delta T_{ij}$, то получаем блок с частичным нагревом холодного и частичным охлаждением горячего потоков в рекуперативном теплообменнике.

В случае, когда выполняются условия $T_j^{c,in} \leq T_i^{h,in} - \Delta T_{ij}$, $T_i^{h,in} - T_j^{c,out} \geq \Delta T_{ij}$, $T_i^{h,out} - T_j^{c,in} \geq \Delta T_{ij}$, $\Delta Q_j^c > \Delta Q_i^h$, теплообмен между i -м горячим и j -м холодным потоками реализуется через ЭБСТ 3. В этом случае поток S_j^c подается в рекуперативный теплообменник E_{ij} , где принимает тепло от потока S_i^h . Далее, в конечном нагревателе B_j потоку S_j^c передается количество тепла $\Delta Q_i^{reb} = \Delta Q_j^c - \Delta Q_i^h$.

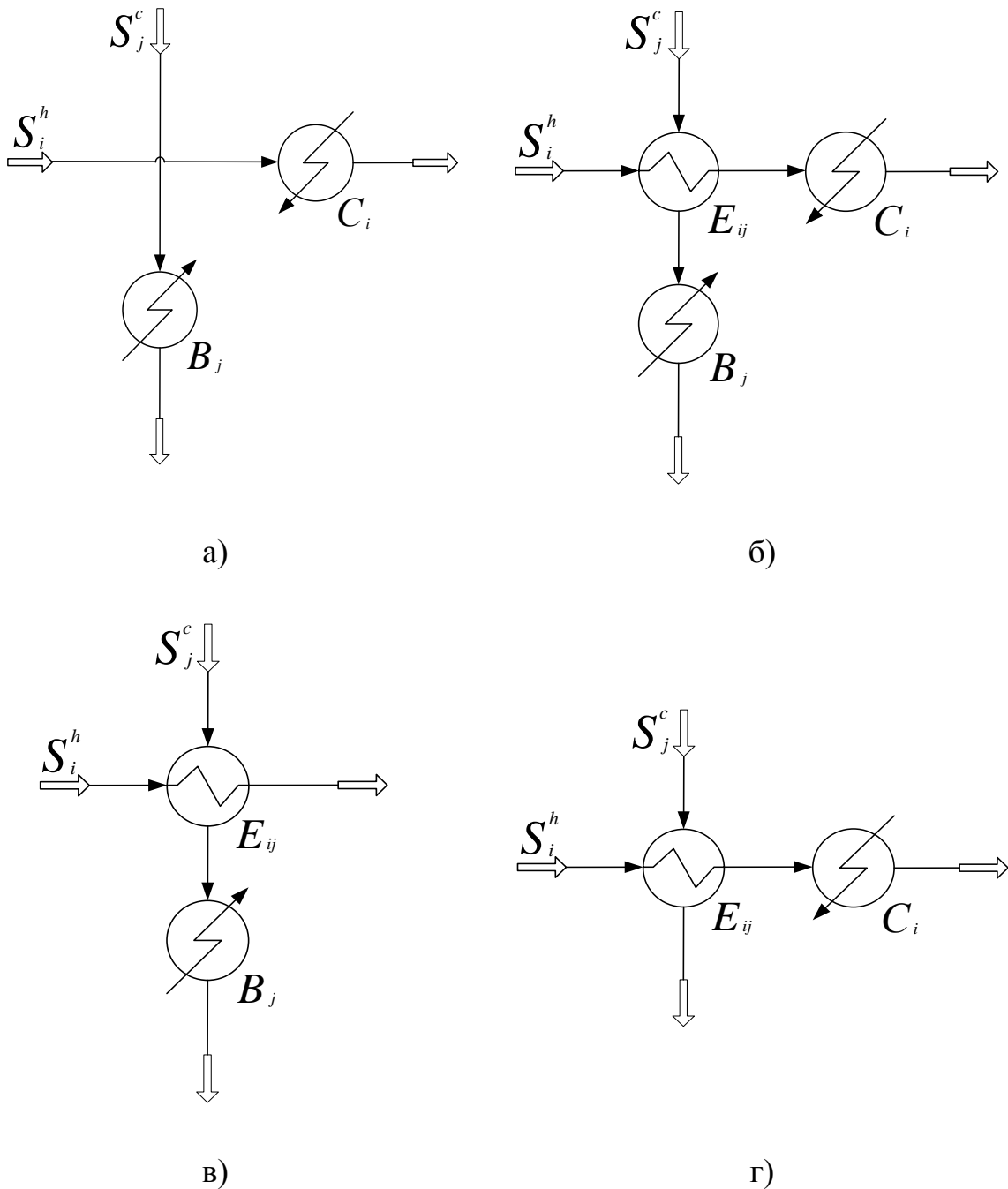


Рис. 1. Элементарные блоки синтеза систем теплообмена:
 а) с автономным нагревом «горячего» и охлаждением «холодного» (ЭБСТ 1); б) с частичной рекуперацией тепла (ЭБСТ 2); в) с концевым кипятильником (ЭБСТ 3); г) с концевым конденсатором (ЭБСТ 4)

Если $T_j^{c,in} \leq T_i^{h,in} - \Delta T_{ij}$, $T_i^{h,in} - T_j^{c,out} \geq \Delta T_{ij}$, $T_i^{h,out} - T_j^{c,in} \geq \Delta T_{ij}$, $\Delta Q_j^c < \Delta Q_i^h$, то теплообмен между i -м горячим и j -м холодным потоками реализуется через ЭБСТ 4. В этом случае часть тепла потока S_i^h

в количестве ΔQ_j^c , может использоваться для испарения потока S_j^c . При этом поток S_i^h подается в рекуперативный теплообменник E_{ij} , где он передает тепло потоку S_j^c . Далее, в конечном холодильнике C_i от потока S_i^h отбирается количество тепла $\Delta Q_i^h - \Delta Q_j^c$.

Поставим в соответствие каждому пересечению горячего потока S_i^h и холодного потока S_j^c двоичную переменную z_{ij} :

$$z_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{необходимо организовать теплообмен между горячим потоком } S_i^h \\ & \text{и холодным потоком } S_j^c \text{ с помощью рекуперативного теплообменника} \\ & \text{в случае } T_j^{c,in} \leq T_i^{h,in} - \Delta T_{ij} \text{ или, в случае отсутствия рекуперативного} \\ & \text{теплообмена, стоимость холодильника и нагревателя включаются} \\ & \text{в стоимость } \Phi. \\ 0, & \text{затраты не учитываются в стоимости } \Phi. \end{cases}$$

Введём ограничения:

$$\sum_{i=1}^M z_{ij} = 1, \quad \sum_{j=1}^M z_{ij} = 1. \quad (1)$$

Для каждого ЭБСТ определим f_{ij} – затраты на нагревание, охлаждение и возможный рекуперативный теплообмен каждой совокупности i -го «горячего» и j -го «холодного» потоков:

f_{ij}^{he} – затраты на рекуперативный теплообменник, определяются по формуле (2):

$$f_{ij}^{he} = c_1 A_{ij}^\gamma. \quad (2)$$

Затраты на холодильник f_i^{cond} и нагреватель f_j^{reb} находятся следующим образом:

$$\begin{aligned} f_i^{cond} &= c_1 A_i^\gamma + c_2 F^c, \\ f_j^{reb} &= c_1 A_j^\gamma + c_3 F^h. \end{aligned} \quad (3)$$

где A_{ij} – поверхность теплообмена рекуперативного теплообменника, A_i – поверхность теплообмена конечного холодильника, A_j – поверхность теплообмена конечного нагревателя, F^c и F^h – массовые расходы хладагента и теплоносителя соответственно, c_1, c_2, c_3 – ценовые коэффициенты, $\gamma = 0.7$.

Любой совокупности переменных z_{ij} будут соответствовать некоторая система теплообмена, затраты на которую определяются функцией (4).

$$\Phi = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M f_{ij} z_{ij} \quad (4)$$

Поэтому эту величину будем использовать в качестве критерия оптимизации в задаче определения оптимальной структуры системы теплообмена. С учётом ограничений (1) эта задача будет иметь вид:

$$\min_{z_{ij}} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M f_{ij} z_{ij} \quad (5)$$

$$\sum_{i=1}^M z_{ij} = 1, \sum_{j=1}^M z_{ij} = 1 \quad i, j = 1, \dots, M$$

Это известная в линейном программировании задача о «назначениях» [8]. Она имеет хорошо разработанные методы решения.

Предлагаемый подход рассмотрим на примере задачи реконструкции узла производства этилового спирта. Упрощенная технологическая схема системы четырех ректификационных колонн без теплоинтеграции изображена на рис. 2.

Холодная бражка подогревается в T001 и поступает в бражную колонну K001. Сконденсированные пары бражной колонны в виде бражного дистиллята подаются в эшюрационную колонну K002. В эшюрационной колонне происходит выделение головных примесей. Пары эшюрационной колонны конденсируются в T005 и отправляются на тарелку питания эфирной колонны K003. В эфирной колонне происходит концентрирование головных примесей. Эшюрат из куба эшюрационной колонны подогревается в T010 и подается на тарелку питания спиртовой колонны K004. На верхнюю тарелку эшюрационной колонны подается

умягченная вода из T004. В спиртовой колонне происходит укрепление спирта и очистка его от хвостовых примесей и части головных примесей. Сивушная фракция отбирается из средней части колонны. Спирт отбирается с верхних тарелок и направляется на дальнейшую очистку.

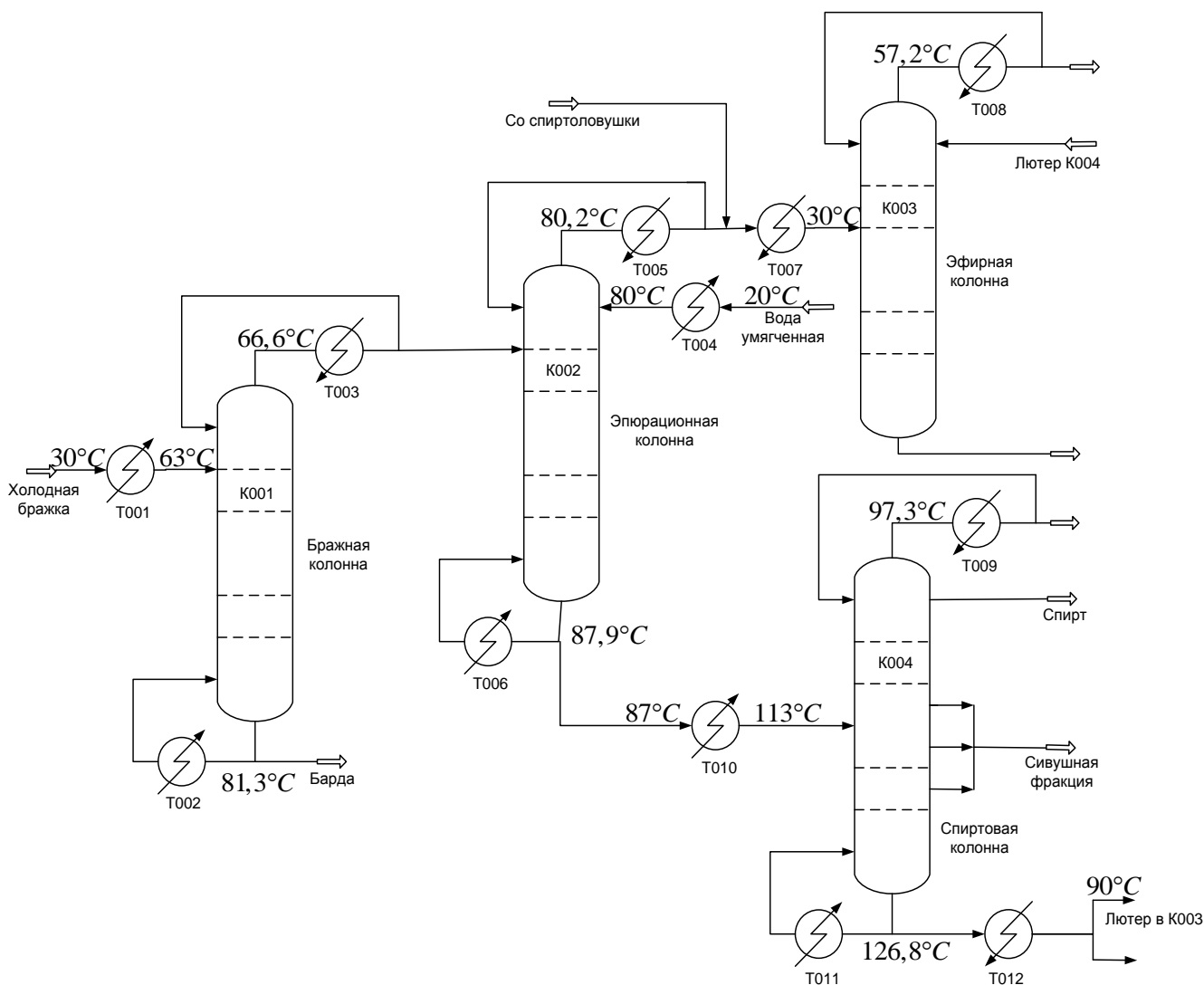


Рис. 2. Упрощённая технологическая схема СРК установки производства этилового спирта без теплоинтеграции

В качестве «горячих» потоков задачи возьмем паровые потоки верха колонн, а также поток кубового продукта K004, частично уходящий в K003. Из «холодных» потоков выделим: нижние рециркулирующие потоки колонн K001 и K002, сырьевые потоки колонн K001 и K004, поток умягченной воды в K002. Результат решения задачи (5) продемонстрирован на рис. 3.

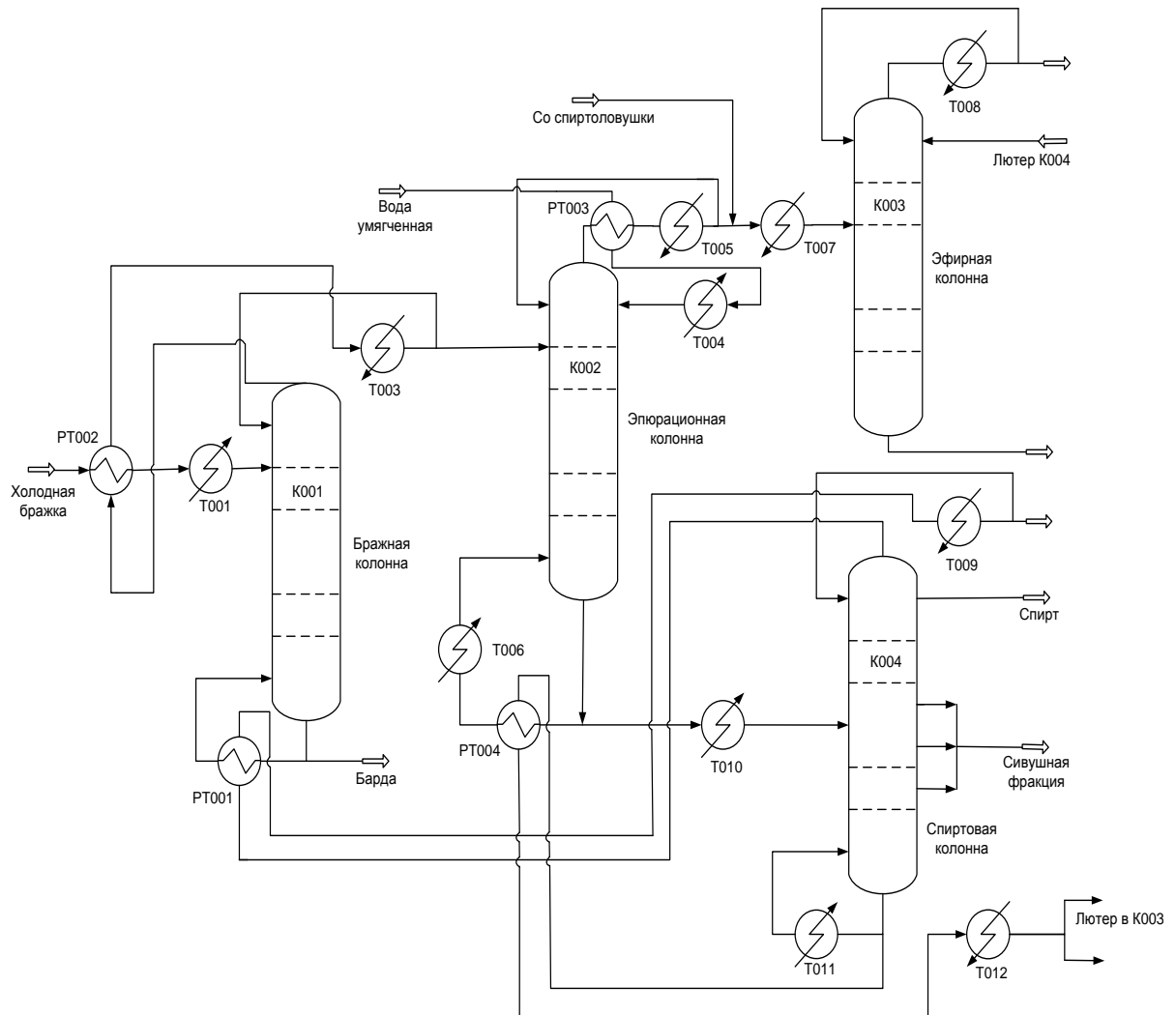


Рис. 3. Упрощённая технологическая схема СРК установки производства этилового спирта с теплоинтеграцией

Теплоинтеграция верхнего потока K001 с подогреваемым потоком бражки, кубового потока K002 с потоком лютера K004, парового потока K002 с потоком умягченной воды через ЭБСТ 2, рециркулирующего нижнего потока K001 с верхним потоком K004 через ЭБСТ 4, а также автономные нагрев сырьевого потока K004 и конденсация парового потока K003 (ЭБСТ 1), позволят уменьшить приведённые суммарные капитальные и энергетические затраты на 62 %. При этом экономия тепловой энергии составит 66 %.

Список литературы

1. Лаптев А.Г., Конахин А.М., Минеев Н.Г. Теоретические основы и расчет аппаратов разделения гомогенных смесей: Учеб. пособие. – Казань: Казан. гос. энерг. ун-т. 2007. – 426 с.

2. Комиссаров Ю.А., Гордеев Л.С., Вент Д.П. Научные основы процессов ректификации: Учеб. пособие для вузов / Под ред. Л.А. Серафимова. – В 2 т. Т. 2. – М.: Химия, 2004. – 416 с.

3. Seider W.D. Product and Process Design Principles: synthesis, analysis, and evaluation / W. D. Seider, J.D. Seader, D. R. Lewin, S. Widagdo. – New York: John Wiley&Sons, Inc. – 2009. – 728 p.

4. Островский Г.М., Бережинский Т.А. Оптимизация химико-технологических процессов. Теория и практика. – М.: Химия, 1984. – 240 с.

5. Островский Г.М., Зиятдинов Н.Н., Мустафина Ф.У., Рыжов Д.А. Оптимальный синтез системы простых ректификационных колонн // Теоретические основы химической технологии. – 2013.– Т. 47. – № 6. – С. 646–655.

6. Островский Г.М., Зиятдинов Н.Н., Лаптева Т.В., Богула Н.Ю. Оптимальное проектирование системы ректификационных колонн // Доклады Академии наук. – 2010. – Т. 431. – № 2. – С. 116–119

7. Островский Г.М., Зиятдинов Н.Н., Емельянов И.И.. Синтез оптимальных систем простых ректификационных колонн с рекуперацией тепла // Доклады Академии наук. – 2015. – Т. 461. – № 2. – С. 189–192.

8. Вагнер Г. Основы исследования операций. – М.: Мир, 1972. – Т. 1. – 335 с.

HEAT INTEGRATION IN THE SYSTEM OF SIMPLE DISTILLATION COLUMNS BASED ON THE MODIFICATION OF THE ASSIGNMENT PROBLEM

I.I. EMEL'YANOV, N.N. ZIYATDINOV, G.M. OSTROVSKII
FSBEI NPE «Kazan national research technological university», Kazan

Annotation. In the report are considered a problem of heat recovery in the synthesis of optimal systems of simple distillation columns and the method of its solution based on a modified formulation of the assignment problem.

Key letters: heat integration, system of distillation columns, optimal synthesis, assignment problem.

УДК 532.135 + 544.77 + 662.757

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СПОСОБОВ СНИЖЕНИЯ ВЯЗКОСТИ ВОДОУГОЛЬНЫХ ТОПЛИВ

Г.Р. МИНГАЛЕЕВА*, А.В. ГАЙНЕТДИНОВ**,
Р.Р. ШАКИРОВ**, Э.А. АХМЕТОВ**

*ФГБУН Казанский научный центр Российской академии наук, г. Казань

**ФГБОУ ВПО «Казанский государственный энергетический
университет», г. Казань

Аннотация. Исследовано влияние пластифицирующих веществ на реологические свойства суспензий, твердая фаза которых представлена в одном случае монодисперсной, а в другом смесью крупнодисперсной и мелкодисперсной фракций угольной пыли. Представлена схема экспериментальной установки для определения вязкости водоугольных топлив с содержанием Кузнецкого угля марки Т 60 % (масс.), из которых мелкодисперсная фракция составляет 5 % твердой фазы. Получена зависимость вязкости водоугольных топлив от скорости сдвига с применением различных пластификаторов: каустическая и пищевая сода, сульфит и лигносульфонат натрия, а также зола. Установлено что наиболее эффективным из перечисленных пластификаторов является лигносульфонат натрия.

Ключевые слова: водоугольное топливо, динамическая вязкость, пластификатор, мелкодисперсная фракция.

На сегодняшний день в нашей стране существуют тенденции к повышению цен на газовое и мазутное топливо. Это связано с быстрым уменьшением запасов нефтяных и газовых месторождений, которое происходит в результате их массового использования за последние несколько десятков лет. Таким образом, согласно энергетической стратегии России до 2030 года существующие тенденции предусматривают развитие угольной энергетики на базе новых экологически чистых технологий использования угля [1].

Как известно, начиная с 80-х годов прошлого века угольное топливо было в значительной мере замещено природным газом и мазутом по причине низких экологических характеристик и высокой цены, обусловленной большой долей в себестоимости транспортной составляющей (более 50 %) [2]. В качестве одного из путей решения

данной проблемы является разработка технологий и комплексов оборудования для производства и использования водоугольного топлива (ВУТ) [1].

ВУТ – это альтернативный вид топлива, который представляет собой дисперсную систему (суспензию), дисперсной фазой которой является уголь с массовой долей 60–75 %, а дисперсионной средой является вода с долей 25–40 % от общей массы [3, 4].

Топливные дисперсные системы обладают большей реакционной способностью, чем исходный уголь, высокой степенью выгорания горючей массы, при их сжигании значительно снижается количество выбросов оксидов серы, азота, монооксида углерода, ароматических канцерогенов, сажи и пыли [5].

Транспортировка ВУТ осуществляется по трубопроводам. Суспензия транспортируется на большие расстояния в несколько сотен километров, что создает серьезные проблемы, такие как оседание твердых частиц и высокая вязкость, поэтому реологические свойства суспензии оказывают большое влияние на требуемую мощность для перекачивания ВУТ.

Для безопасной и экономичной эксплуатации трубопроводной системы и насосных установок необходимо рассмотреть реологические характеристики суспензии, которые имеют существенное значение при транспортировке, и выявить возможные технологии по совершенствованию данных характеристик с целью их промышленного внедрения [6, 7].

В основу регулирования реологических свойств дисперсных систем положен процесс физико-химического воздействия на контактные взаимодействия между частицами дисперсной фазы и дисперсионной средой. В случае применения химических реагентов для регулирования реологических свойств дисперсных систем обычно имеет место адсорбционное модифицирование поверхности с проявлением электростатического и стерического факторов, влияющих на процессы структурообразования [8].

Одной из основных реологических характеристик, влияющих на динамику движения, а также на затраты энергии для перекачивания ВУТ является динамическая вязкость. Ее регулирование осуществляется различными способами, но в качестве основных могут быть рассмотрены следующие: приготовление ВУТ бифракционного состава и добавление различных веществ в качестве пластификаторов.

В данной работе приведены результаты исследований воздействия различных пластифицирующих веществ на реологические характеристики ВУТ моно- и бифракционного состава.

Пробы ВУТ готовили на основе Кузнецкого тощего угля и исследовали на экспериментальной установке, схема которой представлена на рис. 1. Экспериментальная установка позволяет получить крупнодисперсную угольную пыль (размер частиц около 125 мкм) при помощи вибрационной мельницы 2 и мелкодисперсную (размер частиц около 10 мкм) в мельнице-активаторе 9. Приготовление проб ВУТ проводилось следующим образом.

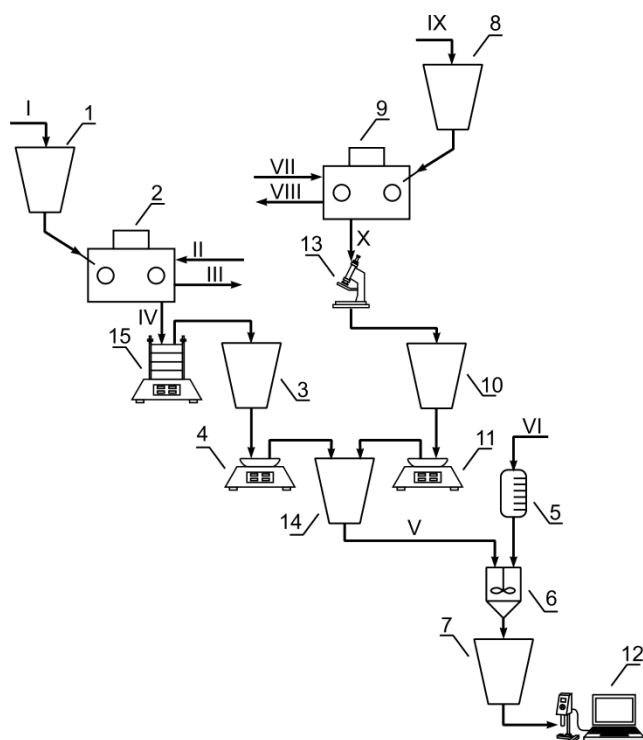


Рис. 1. Принципиальная схема экспериментального стенда для приготовления ВУТ и исследования его реологических свойств:

1, 8 – бункер-питатель; 2 – вибрационная мельница; 3, 10 – бункер для пыли; 4, 11 – весы; 5 – мерная емкость; 6 – смеситель; 7 – бункер хранения; 9 – мельница-активатор; 12 – ротационный вискозиметр; 13 – микроскоп; 14 – сборная емкость; 15 – вибростенд; I – дробленый уголь; II – подача охлаждающей воды; III – отвод охлаждающей воды; IV – угольная пыль; V – угольная пыль на смешение; VI – вода для приготовления ВУТ; VII – дробленый уголь; VIII – молотый уголь

Дробленый уголь из бункера 1 направляется на измельчение в вибрационную мельницу 2. Полученная угольная пыль просеивается

на отдельные фракции на вибростенде 15, состоящем из пяти сит с размерами ячеек 0,2; 0,125; 0,09; 0,063; 0,05 мм. Частицы нужного размера отделяются и направляются в бункер 3 для хранения. На весах 4 крупнодисперсная пыль взвешивается и подается в сборную емкость 14 для смешения с мелкодисперсной пылью. Мелкодисперсная пыль получается размолотом в мельнице 9 угля, поступающего из бункера 8. Определение размера частиц проводится с помощью электронного микроскопа 13, затем частицы взвешиваются. После смешения мелко- и крупнодисперсной фракции в емкости 14 угольная пыль подается в смеситель 6, в который дозируется вода из мерной емкости 5. Вязкость полученной смеси определяется с помощью ротационного вискозиметра 12 марки RM 100.

Были исследованы водоугольные суспензии с содержанием угольной пыли 60 % (масс.). Угольная пыль состояла в первом случае из одной фракции, которая представляла собой остаток на сите 125 мкм и во втором случае из двух фракций: крупная фракция – 125 мкм, мелкая фракция состояла из частиц со средним диаметром 10 мкм, который определяли при помощи микроскопа. Содержание мелких частиц в ВУТ бифракционного состава 5 % от массы угольной пыли. Динамическую вязкость суспензий определяли в диапазоне скоростей сдвига от 2,01 до 303,70 с⁻¹. После статистической обработки определяли средние значения по трем измерениям. На рис. 2 представлены результаты исследований в виде зависимостей динамической вязкости ВУТ от скорости сдвига в диапазоне от 12,05 до 148,80 с⁻¹.

Результаты исследований показали, что при отсутствии пластификаторов происходит значительное уменьшение динамической вязкости ВУТ от 3,86 до 1,39 Па · с, при значениях скорости сдвига от 12,05 до 50,62 с⁻¹. Зависимости для ВУТ бифракционного состава без пластификатора и для ВУТ с золой практически совпадают, и накладываются друг на друга при больших скоростях сдвига.

Остальные пластификаторы имеют заметно большее воздействие на вязкость даже при низких скоростях сдвига. При добавлении каустической и пищевой соды значения вязкости ВУТ практически не отличаются друг от друга и имеют одинаковый характер изменения от 1,2 до 0,6 Па · с во всем диапазоне скоростей сдвига.

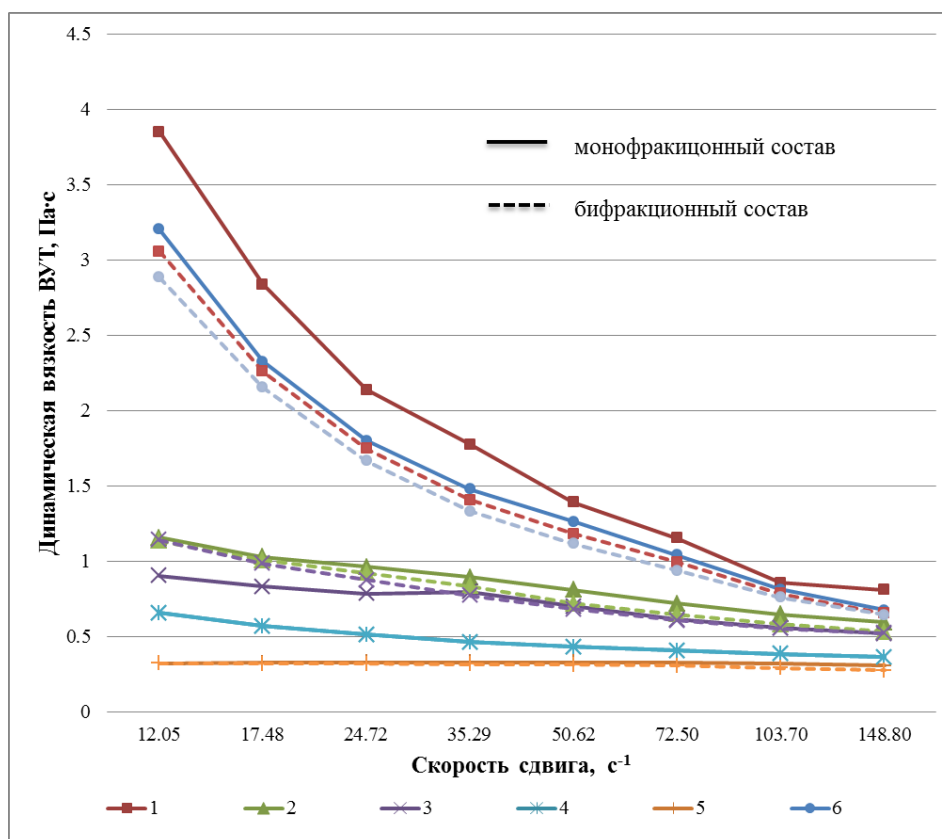


Рис. 2. Зависимости динамической вязкости ВУТ монофракционного и бифракционного состава от скорости сдвига при отсутствии и наличии различных веществ в качестве пластификаторов: 1 – отсутствует; 2 – сода каустическая; 3 – сода пищевая; 4 – натрия сульфит; 5 – натрия лигносульфонат; 6 – зола

В наибольшей степени отличаются показатели для ВУТ, пластификаторами в которых являются сульфит и лигносульфонат натрия. При скорости сдвига $12,05 \text{ с}^{-1}$ значения вязкости составляют $0,65$ и $0,32 \text{ Па} \cdot \text{с}$, что соответствует минимальным значениям при низких скоростях сдвига.

Так как транспортировка ВУТ осуществляется при скорости сдвига около 10 с^{-1} [9], что соответствует скоростям движения ВУТ в трубопроводах $0,2\text{--}0,5 \text{ м/с}$ можно сделать вывод, что наиболее эффективным пластификатором будет служить лигносульфонат натрия. Таким образом, чтобы определить целесообразность применения того или иного способа понижения вязкости ВУТ необходимо провести технико-экономический анализ и в дальнейшем осуществить исследование возможности его промышленного внедрения, учитывая все остальные факторы.

Список литературы

1. Энергетическая стратегия России на период до 2030 года. Утверждена Распоряжением Правительства РФ от 13 ноября 2009 г. № 1715-р.
2. Гайнетдинов А.В., Шакиров Р.Р., Ахметов Э.А. Способы транспортировки каменного угля // XII межд. науч.-технич. конф. «Современные научно-технические проблемы теплоэнергетики»: сб. мат. док. Саратов: СГТУ, 2014. – С. 209–211.
3. Ongsirimongkol N., Narasingha M.H. Effects of stabilizing agents on stability and rheological characteristics of the highly-loaded coal-water slurry // International Journal of Chemical Engineering and Applications. February 2012. Vol. 3, No. 1. p. 49–52.
4. Boylu F., Dinçer H., Ateşok G. Effect of coal particle size distribution, volume fraction and rank on the rheology of coal–water slurries // Fuel Processing Technology. No 85. 2004. p. 241–250.
5. Савицкий Д.П. Реологические свойства водных суспензий угля в присутствии анионных пав и блоксополимеров оксида этилена-пропилена // Хімія, фізика та технологія поверхні. – 2013. – Т. 4. – № 2. – С. 211–218.
6. Sah B.K. Optimization of amount of additives to minimize relative viscosity of coal-water slurry // IOSR Journal of Applied Chemistry (IOSR-JAC) ISSN: 2278-5736, p. 58–62.
7. Meikap B.C., Purohit N.K., Mahadevan V. Effect of microwave pretreatment of coal for improvement of rheological characteristics of coal–water slurries // Journal of Colloid and Interface Science. 2005. P. 285.
8. Макарова Е.В., Макаров А.С., Савицкий Д.П., Боровик Н.И. Влияние концентрации водорастворимых полимеров на реологические свойства водоугольных суспензий антрацита // Хімія, фізика та технологія поверхні. – 2014. – Т. 5. – № 2. – С. 236–240.
9. Урьев Н.Б. Текучесть суспензий и порошков. М.: Химия, 1992. – 256 с.

COMPARATIVE ANALYSIS OF REDUCE THE VISCOSITY OF COAL-WATER FUELS

G.R. MINGALEEVA*, A.V. GAYNETDINOV**, R.R. SHAKIROV**,
E.A. AKHMETOV**

*Kazan Scientific Center of Russian Academy of Science, Kazan

**FSBEI HPE «Kazan power-engineering university», Kazan

Annotation. The effect of plasticizing substances on the rheological properties of the slurry, the solid phase of which is represented in one case, a monodisperse, and the other a mixture of coarse and fine fractions of the coal dust is researched. The scheme of the experimental setup to determine the viscosity of coal-water fuel with the content of the Kuznetsk coal rank T 60 wt.%, of which the fine fraction is 5% solids. The dependence of the viscosity of coal-water fuel shear rate using different plasticizers: soda and baking soda, sulfite and sodium lignosulfonate and ashes. It was established that the most effective of these plasticizers is sodium lignosulfonate.

Key words: hydrocarbon fuel, the viscosity of the suspension, the plasticizer, the fine fraction.

УДК 536.2

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИХ КРАСОК

В.В. БУХМИРОВ*, А.К. ГАСЬКОВ*

*ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет
имени В.И. Ленина», г. Иваново

Аннотация. Приведены результаты исследования коэффициента теплопроводности энергосберегающей краски в диапазоне температур 20–100 °С в зависимости от массового содержания микросфер в связующем из акрила.

Ключевые слова: энергосберегающая краска, коэффициент теплопроводности, микросфера.

Снижение тепловых потерь является актуальной задачей повышения энергетической эффективности объектов производства, передачи и потребления тепловой энергии. Для уменьшения потерь тепловой энергии используют различные теплоизоляционные материалы, которые должны обладать рядом качеств – низкой теплопроводностью, малой поглощательной способностью влаги, низкой коррозионной активностью, механической прочностью и др. [1–4]. В настоящее время на рынке теплоизоляционных материалов появился новый теплоизоляционный материал – тонкоплёночные теплоизоляционные покрытия (энергосберегающие краски), содержащие в своём составе микросферы. Энергосберегающая краска – это эмульсия, состоящая из связующего компонента и микроскопических керамических или стеклянных пустотелых сфер диаметром 0,03÷0,1 мм. Энергосберегающие краски обладают свойствами красок – защищают поверхность от воздействия окружающей среды, и свойствами тепловой изоляции – снижают тепловые потери за счёт своей пористой структуры. К достоинствам энергосберегающих красок относят [5]:

- дешевизну компонентов, из которых её изготавливают;
- низкую стоимость покрасочных работ;
- высокую адгезию к любым материалам, кроме полиэтилена;
- механическую прочность;
- антигрибковые и противогрибковые свойства;
- влаго- и паронепроницаемость покрытия;

- устойчивость к ультрафиолетовому излучению;
- хорошую колеруемость пигментами.

Производители тонкоплёночных теплоизоляционных покрытий, например [6], приводят значение коэффициента теплопроводности энергосберегающей краски в интервале 0,001–0,012 Вт/м·К. При таком значении коэффициента теплопроводности толщина теплоизоляционного покрытия из энергосберегающей краски будет много меньше слоя из любого другого вида классической тепловой изоляции. Например, слой энергосберегающей краски толщиной 1 мм с коэффициентом теплопроводности 0,001 Вт/м·К обеспечивает такое же снижение тепловых потерь, как слой из минераловатной тепловой изоляции толщиной 50 мм с коэффициентом теплопроводности 0,05 Вт/м·К.

Однако, ряд учёных в работах [7–10] утверждают, что коэффициент теплопроводности энергосберегающих красок значительно больше и лежит в интервале 0,02–0,12 Вт/м·К. В этом случае, для достижения соизмеримого энергосберегающего эффекта толщина тонкоплёночного покрытия должна быть одного порядка с традиционными теплоизоляторами. Поэтому выбор энергосберегающей краски в качестве тепловой изоляции должен проводиться на основе технико-экономического расчёта. Например, в докладе [11] показано, что энергосберегающую краску эффективно применять для тепловой изоляции трубопроводов горячей воды, работающих в условиях повышенной влажности.

Широкий диапазон значений коэффициента теплопроводности энергосберегающих красок обусловлен, во-первых, количеством наполнителя и его структурой (количеством микросфер и их строением) и, во-вторых, составом связующего компонента.

Целью данной работы является определение коэффициента теплопроводности энергосберегающей краски в зависимости от массового содержания полых стеклянных микросфер марки МС-В2Л производства НПО «Стеклопластик» (Московская обл.). Эксперимент был выполнен на образцах энергосберегающей краски, произведённой на одном из предприятий химической промышленности г. Иваново, с массовым содержанием микросфер в связующем из акрила 8 %, 25 % и 32,6 % и чисто акрилового покрытия без добавления микросфер. Толщина исследуемых образцов составила: 1,5 мм для связующего акрила с добавлением микросфер и 1 мм для чистого акрила. Заметим, что массовое содержание микросфер в связующем акриле, равное 32,6 %, является максимально возможным для данного типа связующего, так как

увеличение концентрации микросфер приводит к браку продукции из-за образования комков микросфер в объёме акрила.

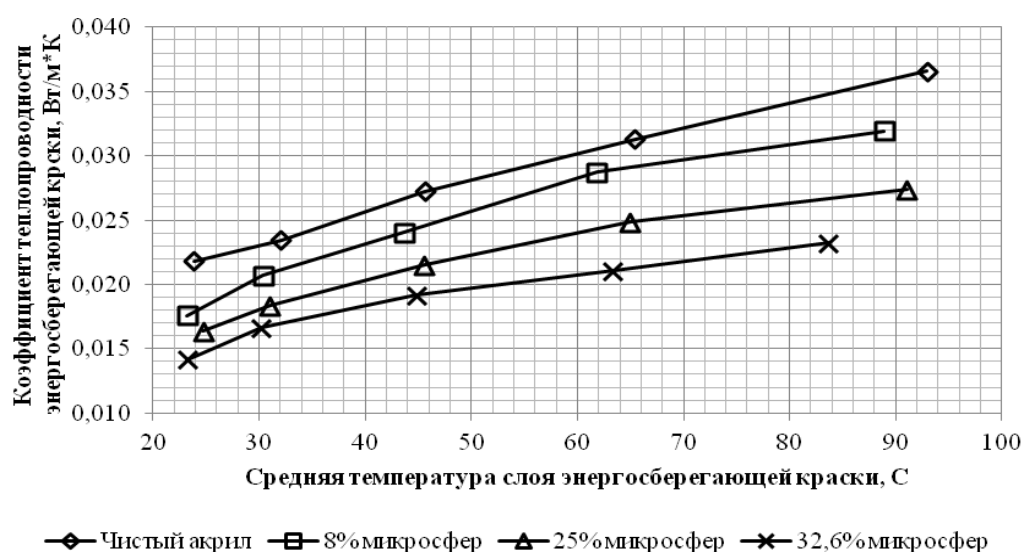
Экспериментальные значения коэффициента теплопроводности тонкоплёночных покрытий получены методом цилиндрического слоя в стационарном режиме теплопроводности на лабораторном стенде, разработанном на кафедре «Теоретические основы теплотехники» ИГЭУ [12]. Установка представляет собой толстостенный стальной цилиндр с наружным диаметром 245 мм, толщиной стенки 10 мм и длиной 630 мм, внутри которого установлены два электрических нагревателя, подключённые к электрической сети через автотрансформатор в целях регулировки потребляемой мощности. Для обеспечения равномерного теплообмена на поверхности рабочего участка и исключения конвективных потоков около электрических нагревателей внутри цилиндра его внутренняя полость была засыпана керамзитом. Для исключения тепловых потерь боковая нерабочая и торцевые поверхности цилиндра были покрыты тепловой изоляцией. Температура поверхности цилиндра измерена при помощи термопар, равномерно зачеканенных в 8 точках по окружности рабочего участка стенда.

Полоса из тонкой жести шириной 50 мм и толщиной 0,2 мм, на которую была нанесена энергосберегающая краска, накладывается на рабочий участок экспериментальной установки. Температура внутренней поверхности слоя исследуемого образца равна средней температуре поверхности цилиндра, которая была найдена по показаниям термопар рабочего участка. Температура наружного слоя исследуемого образца определена при помощи 4 контактных термопар, накладываемых на испытуемый образец. Плотность теплового потока, проходящего через слой энергосберегающей краски определена измерителем плотности тепловых потоков ИТП-МГ4.03/Х(1) «Поток» с относительной погрешностью измерения $\pm 6\%$ и функцией автоматической фиксации показаний. Медь-константановые термопары (тип Т с погрешностью определения температуры $\pm 1\text{ }^\circ\text{C}$), при помощи которых была измерена температура внутренней и наружной поверхности энергосберегающей краски, были подключены к накопителю данных ADAM-4000.

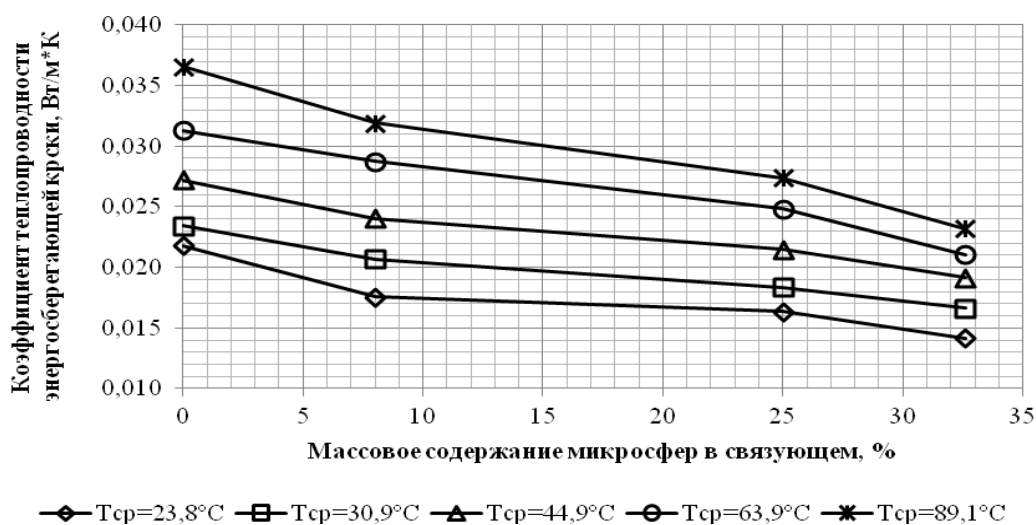
Была выполнена серия экспериментов с различными значениями теплового потока, который рассчитывался по мощности электронагревателей. Мощность электронагревателей регулировалась напряжением, подаваемым от автотрансформатора в диапазоне от 5 до 65 В с шагом 15 Вольт. Метод цилиндрического слоя определения коэффициента теплопроводности относится к классу стационарных

методов. Стационарный режим теплопроводности в лабораторной установке наступал через 24 часа нагрева. Показания измерительных приборов фиксировались с интервалом 1 час в автоматическом режиме накопителем данных ADAM-4000 и ИТП-МГ4.03/Х(І) «Поток».

Статистическая обработка результатов эксперимента выполнена в программе Microsoft Excel. Коэффициент теплопроводности энергосберегающей краски найден решением обратной задачи теории теплопроводности по методу цилиндрического слоя. Экспериментальные значения коэффициента теплопроводности в зависимости от температуры и массового состава графически представлены на рис. 1.



а) зависимость от температуры



б) зависимость от массовой концентрации микросфер

Рис. 1. Коэффициент теплопроводности энергосберегающей краски

Из рис. 1 видно, что коэффициент теплопроводности практически линейно увеличивается с ростом средней температуры исследуемого образца и уменьшается с увеличением содержания микросфер в связующем из акрила. Среднее значение коэффициента теплопроводности в интервале температур 20–100 °С составило: для связующего акрила – $\sim 0,028$ Вт/м·К; при 8 % содержании микросфер в энергосберегающей краске – $\sim 0,025$ Вт/м·К; при 25 % содержании микросфер по массе – $0,022$ Вт/м·К; при 32,6% содержании микросфер – $0,019$ Вт/м·К.

Выводы

1. Разработан лабораторный стенд для определения коэффициента теплопроводности тонкоплёночных покрытий в интервале температур 20–100 °С.

2. Экспериментально установлено, что среднее значение коэффициента теплопроводности энергосберегающей краски на основе связующего из акрила в интервале температур 20–100 °С лежит в пределах $0,019–0,028$ Вт/м·К в зависимости от массовой доли содержания микросфер.

3. Коэффициент теплопроводности энергосберегающей краски практически линейно увеличивается с ростом температуры и уменьшается с увеличением содержания микросфер в связующем из акрила.

Список литературы

1. ГОСТ 16381-77 Материалы и изделия строительные теплоизоляционные.

2. Бобров Ю.Л. и др. Теплоизоляционные материалы и конструкции: Учебник для средних профессионально-технических учебных заведений / Ю.Л. Бобров, Е.Г. Овчаренко, Б.М. Шойхет, Е.Ю. Петухова. – М.: ИНФРА-М, 2003. – 268 с.: ил.

3. Игнатова О.А. Технология изоляционных строительных материалов и изделий. В 2 ч. Ч. 2. Тепло- и гидроизоляционные материалы и изделия: Учеб. пособие для студ. учреждений высш. проф. Образования / О.А. Игнатова. – М.: Изд. центр «Академия», 2012. – 288 с.

4. Соколов Е.Я. Теплофикация и тепловые сети: Учебник для вузов. – 7-е изд., стереот. – М.: Изд-во МЭИ, 2001. – 472 с.: ил.

5. Антонова А.М., Воробьев А.В., Ляликов Б.А. К выбору материалов для нетрадиционной тепловой изоляции оборудования ТЭС и АЭС // Материалы четырнадцатой Всероссийской научно-технической конференции «Энергетика: экология, надежность, безопасность». – Томск: Изд-во ТПУ, 2008. – 289 с.

6. Бояринцев А.В. Тепло, сохранённое КОРУНДом // Кровельные и изоляционные материалы. – № 4. – 2010. – С. 10–11.

7. Образцов Д.В., Фокин В.М. Исследование прочностных и теплофизических свойств наномодифицированных строительных и теплозащитных материалов // Вестник ТГТУ. – 2012. – Т. 18. – № 4. – С. 1051–1061.

8. Кисляк С.М., Сеначин П.К. Исследование теплозащитных свойств теплоизоляционного покрытия Re-Therm // Ползуновский вестник. – 2014. – № 1. – С. 64–67.

9. Губинский М.В., Затопляев Г.М., Радченко Р.Ю. Исследование теплофизических свойств керамического жидкого теплоизоляционного покрытия// Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика : збірник наукових праць. – Випуск 3. – Дніпропетровськ : Нова ідеологія, 2011. – 256 с. – С. 94–101.

10. Бухмиров В.В., Гаськов А.К., Орищенко Е.А. Исследование энергосберегающих покрытий/ Сборник научных трудов международной научно-практической конференции «Состояния и перспективы развития электротехнологий» (XVI Бенардосовские чтения). – Иваново: ГОУ ВПО «ИГЭУ имени В.И. Ленина», 2011. – Т. 2. – С. 164–165.

11. Бухмиров В.В., Гаськов А.К. Перспективы производства и применения современных энергосберегающих покрытий// Девятая Международная теплофизическая школа (МТФШ-9) «Теплофизические исследования и измерения при контроле качества веществ, материалов и изделий». 6–11 октября 2014 г. Душанбе: Филиал НИУ «МЭИ», 2014. – С. 201–205.

12. Гаськов А.К., Бухмиров В.В. Экспериментальный стенд для определения коэффициента теплопроводности // Радиотехника, электротехника и энергетика: Девятнадцатая Междунар. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов: Тез. докл. В 4 т. Т. 4. М.: Изд. дом МЭИ, 2013. – 334 с.

RESEARCH HEAT-SHIELDING PROPERTIES OF ENERGY SAVING PAINT

V.V. BUKHMIROV*, A.K. GASKOV*

*FSBEI NPE «Ivanovo state power university», Ivanovo

Annotation. Presents results of investigation coefficient of the thermal conductivity of energy saving paint in the range of temperature 20–100 °C depending on the weight content of microspheres in binder of acrylic.

Key letters: energy saving paint, coefficient of thermal conductivity, microsphere.

УДК 533.6.011.6

РАЗРАБОТКА ЭФФЕКТИВНЫХ СПОСОБОВ ПОВЫШЕНИЯ ЭКОНОМИЧНОСТИ РАБОТЫ ГАЗОВЫХ ТУРБИН

В.Н. КОВАЛЬНОГОВ*, Р.В. ФЕДОРОВ*, Д.А. ГЕНЕРАЛОВ*

*ФГБОУ ВПО «Ульяновский государственный технический университет»,
г. Ульяновск

Аннотация. Рассмотрены пути повышения экономичности работы современных газовых турбин, в том числе с помощью разработки программно-информационных комплексов для анализа теплового состояния лопаток турбомашин и использования последних исследований в области газовой динамики.

Ключевые слова: охлаждение лопаток турбомашин, программно-информационный комплекс, газодинамическая температурная стратификация.

Для улучшения параметров газовых турбин прибегают к повышению температуры газа перед турбиной и соответствующему повышению давления в компрессоре. Благодаря комплексным исследованиям и применению конструкторско-технологических разработок способов охлаждения и тепловой защиты лопаток удалось повысить температуру газа перед турбиной свыше 1700 К, а также повысить тепловую экономичность на 2–2,5%. Дальнейшее повышение рабочих параметров требует применения более совершенных способов охлаждения, обеспечивая при этом надежную работу лопаток, которые подвергаются воздействию центробежных сил, термической усталости, вибрации. По роду применяемого хладагента системы охлаждения разделяются на воздушные, жидкостные и воздушно-жидкостные [1]. Несмотря на то, что жидкостное охлаждение способно обеспечивать повышение температуры газа практически до максимальных температур горения углеводородных топлив, ввиду большей надежности эксплуатации в основном применяется воздушное охлаждение. Для охлаждения наиболее теплонагруженных входной и выходной кромок применяется заградительно-конвективное охлаждение. Также используют интенсификаторы теплообмена, в качестве которых выступают ребра, выступы, перемычки [2].

Для создания эффективных способов тепловой защиты необходимо знать распределение нестационарных температурных полей по поверхности и в теле лопатки. Для этого максимально точно определить тепловые потоки от газа к лопаткам с учетом воздействия режима течения потока, неизотермичности, градиента давления и прочих факторов [3].

Для проектирования высокотемпературных лопаток газовых турбин применяются программные комплексы, для которых разрабатываются эффективные математические модели. На кафедре «Теплоэнергетика» Ульяновского государственного технического университета на базе пакета TurboWorks разрабатывается программно-информационный комплекс для расчета теплового состояния лопаток турбомашин, встроенный в среду SolidWorks. Применение среды SolidWorks позволяет на этапе проектирования проводить расчеты необходимое число раз, используя только данную среду и программно-информационный комплекс [4].

На стадии автоматизированного проектирования создается твердотельная модель изучаемой лопатки. Для определения граничных условий теплообмена на поверхности и элементах схемы охлаждения создается расчетная сетка. На стадии проектирования погрешность расчетного прогнозирования распределения температуры не должна превышать 20–30 К [5]. Погрешность при задании коэффициента теплоотдачи в 20 % может привести к ошибке в расчете в 40–60 К. На основании определения максимальных и минимальных температур для различных сеток с учетом зависимости теплофизических свойств материала лопатки от температуры установлено, что удовлетворительная точность расчета достигается при количестве расчетных элементов равном и более 80000. Для этого применяется явная разностная схема второго порядка аппроксимации по пространственным переменным и 1-го порядка по времени. На рис. 1 представлена сгенерированная разностная сетка с числом расчетных элементов 80000.

Определение граничных условий теплообмена производится путем численного решения дифференциальных уравнений пограничного слоя (уравнения теплоотдачи, эффективности завесы, уравнений энергии, движения, неразрывности и уравнения состояния) на поверхностях спинки и корыта с определением местных коэффициентов теплоотдачи, температуры «восстановления» продуктов сгорания, адиабатной температуры поверхности спинки и корыта. Для определения влияния фактора динамической нестационарности, продольного градиента давления и кривизны обтекаемой поверхности в уравнении определения

длины пути смещения используется зависимость, предложенная Ковальновым Н.Н. [5].

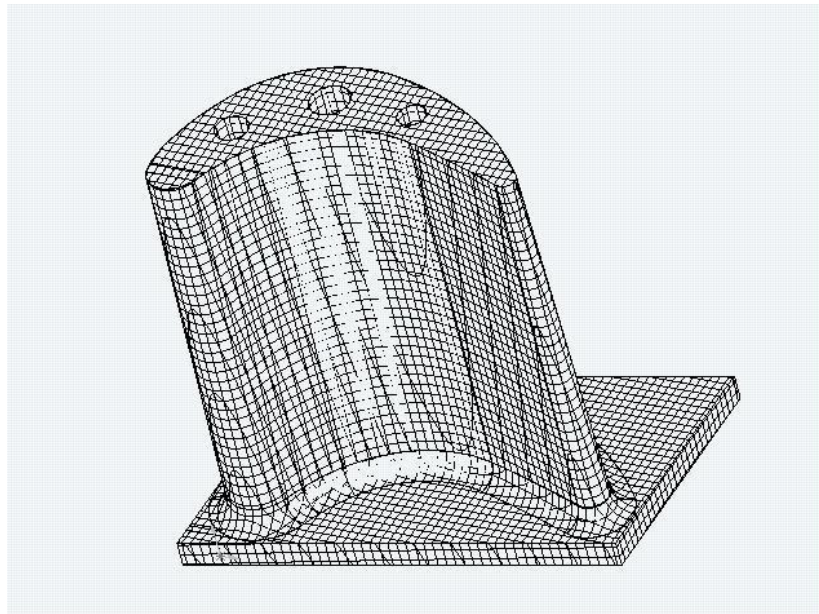


Рис. 1. Сгенерированная разностная сетка для расчета теплового состояния лопатки

$$\alpha_T = 0,4 \sqrt{\frac{1 - \frac{4,9}{\left(\frac{\partial w_x}{\partial y}\right)_{y=0}} \left[\frac{\left(\frac{\partial P_{\text{мн}}}{\partial t}\right) w_{x\text{мн}}}{\rho_{\text{мн}} w_{x0} w_{x\text{мн}}} \frac{w_{x\text{мн}}}{r} \right]}{1 + 21,4 \frac{\left(\frac{\partial P_{\text{мн}}}{\partial x}\right)}{\rho_{\text{мн}} u_0 \left(\frac{\partial w_x}{\partial y}\right)_{y=0}}}}. \quad (1)$$

Индекс α_T в формуле (1) характеризует параметры течения в рассматриваемом сечении за пределами пограничного слоя.

Также граничные условия определяются на основе уравнений подобия. Для этого поверхность лопатки и элементов схемы охлаждения делится на характерные участки, для которых записывается свое уравнение подобия.

С помощью разрабатываемого программно-информационного комплекса можно задавать конструкционный материал лопатки и тип охлаждающего теплоносителя. В зависимости от параметров работы турбины для расчета задаются значения температуры, давления, скорости потока и охладителя, а также степень турбулентности. В качестве примера приведен расчет теплового состояния лопатки с температурной рабочего тела 1500 К, температурой охладителя 400 К, давлением рабочего тела 600 кПа.

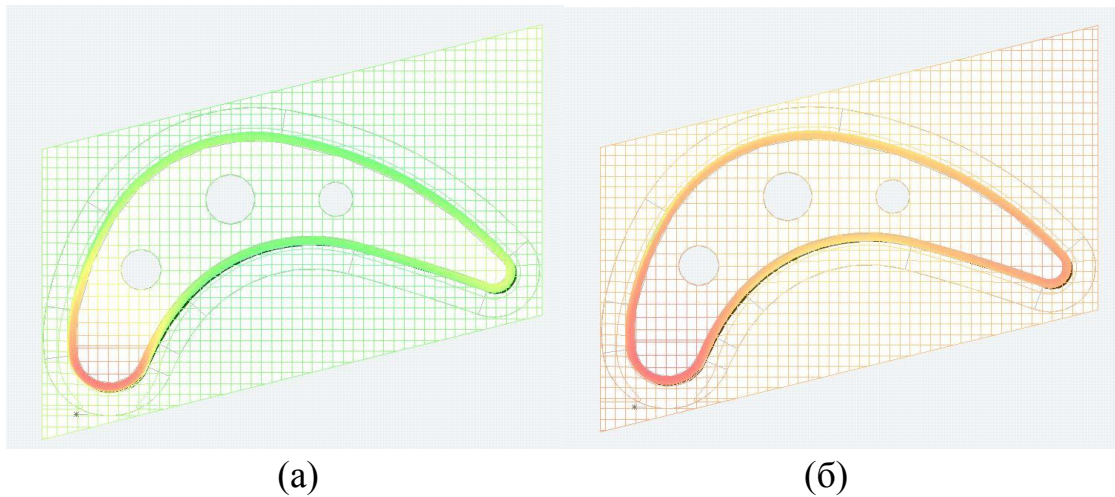


Рис. 2. Тепловая картина проектируемой лопатки в зависимости от длительности прогрева: а) 20 секунд; б) 120 секунд

Для более точного определения выбирались значения температур в характерных сечениях – по середине пера лопатки и на торце.

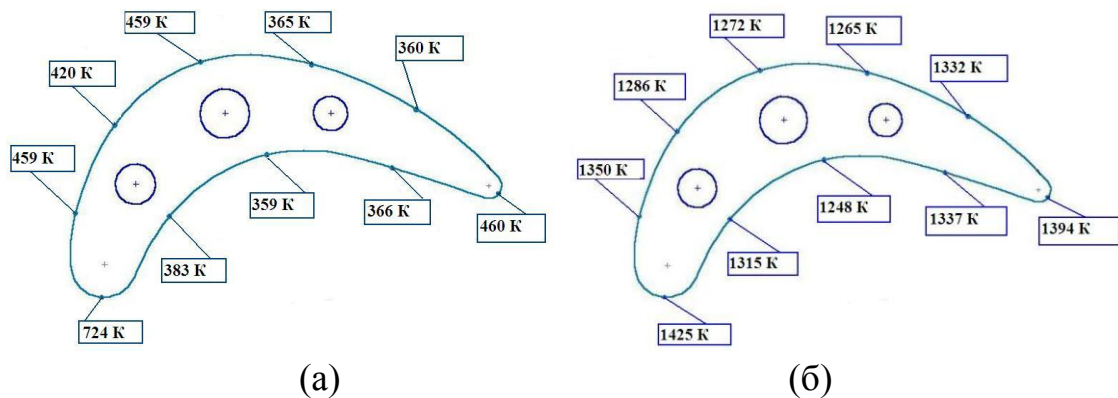


Рис. 3. Распределение температуры в характерном сечении по середине пера лопатки в зависимости от длительности прогрева: а) 3 секунды; б) 300 секунд

Из рис. 2, 3, 4 видно, что наиболее теплонагруженными являются входная и выходная кромки. В среднем сечении пера лопатки входная и выходная кромки прогреваются до 1425 К, в торце до 1433 К. При этом температура спинки и корыта ниже более чем на 100 К. Неравномерность прогрева лопатки, являющаяся существенным недостатком конвективно-заградительного охлаждения, существенно снижает срок ее эксплуатации.

Для уменьшения неравномерности прогрева и снижения выбросов охлаждающего воздуха в проточную часть турбины с помощью разрабатываемого программно-информационного комплекса исследуется

возможность создания техники охлаждения турбинных лопаток с помощью газодинамической температурной стратификации дисперсных потоков. Для этого в нем создана база данных, дополняемая результатами исследований данного феномена. Применение техники охлаждения, основанной на применении газодинамической температурной стратификации обусловлено тем, что в дисперсном потоке в условиях направленного поперечного (инерционного) перемещения частиц в пограничном слое происходит интенсификация теплоотдачи [6]. Это позволит избежать перегретых зон в теле лопатки, и сократить расход охлаждающего воздуха за счет снижения диаметров охлаждающих каналов.

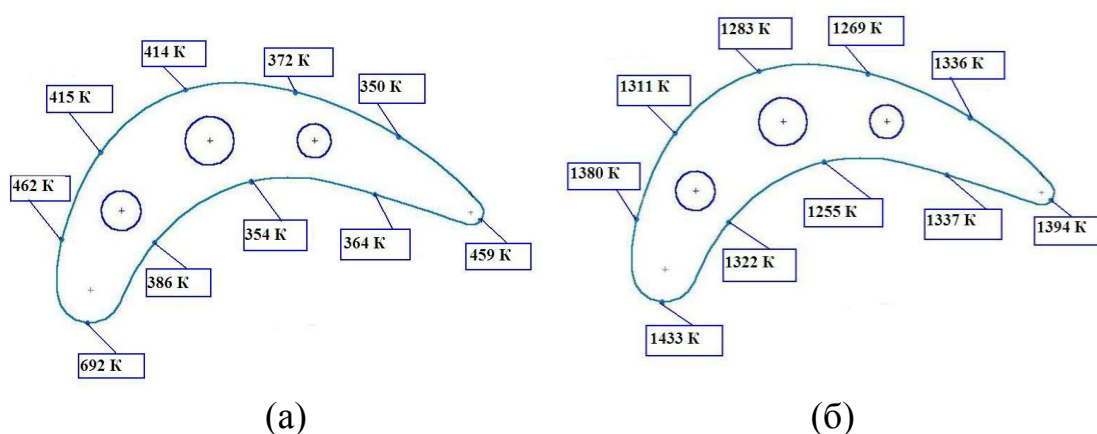


Рис. 4. Распределение температуры в характерном сечении на торце лопатки в зависимости от длительности прогрева:
а) 3 секунды; б) 300 секунд

Математическая модель теплового состояния лопатки дополняется граничными условиями третьего рода для поверхности лопатки со стороны газа в канале для разделения потока:

$$-\lambda_{\text{л}} \left(\frac{\partial T}{\partial n} \right)_w = \alpha_{\text{г}} (T_{\text{г3}} - T_{\text{г2}}). \quad (2)$$

Один из способов применения феномена газодинамической температурной стратификации уже реализован в виде изобретения «Газотурбинный двигатель» (рис. 5). Решение о выдаче патента на изобретение (заявка №2014110128/06(015977)). На выходе из камеры сгорания двигателя устанавливается устройство для разделения газового потока, содержащее сверхзвуковое сопло, внешнюю трубу, внутреннюю трубу, коаксиально расположенные друг относительно друга, канал

рециркуляции дозвукового потока обратно в камеру сгорания. Температура поверхности со стороны сверхзвукового потока будет ниже, чем температура поверхности со стороны дозвукового потока. Образующийся перепад температур приводит к возникновению теплового потока от дозвуковой части течения к сверхзвуковой. Дозвуковой поток, отдав тепло сверхзвуковому потоку, направляется по каналу рециркуляции дозвукового потока обратно в камеру сгорания. Сверхзвуковой поток на выходе из устройства для разделения потока, более нагретый и с более высоким давлением поступает и расширяется в турбине, вращает вал двигателя и выбрасывается в атмосферу. Благодаря разделению потока газа на дозвуковой и сверхзвуковой происходит повышение давления и температуры рабочего тела (сверхзвукового потока газа) и, следовательно, увеличение КПД газотурбинного двигателя, так как для современных газовых турбин одним из главных факторов, влияющих на экономичность газотурбинных установок является непрерывное повышение температуры газа перед турбиной.

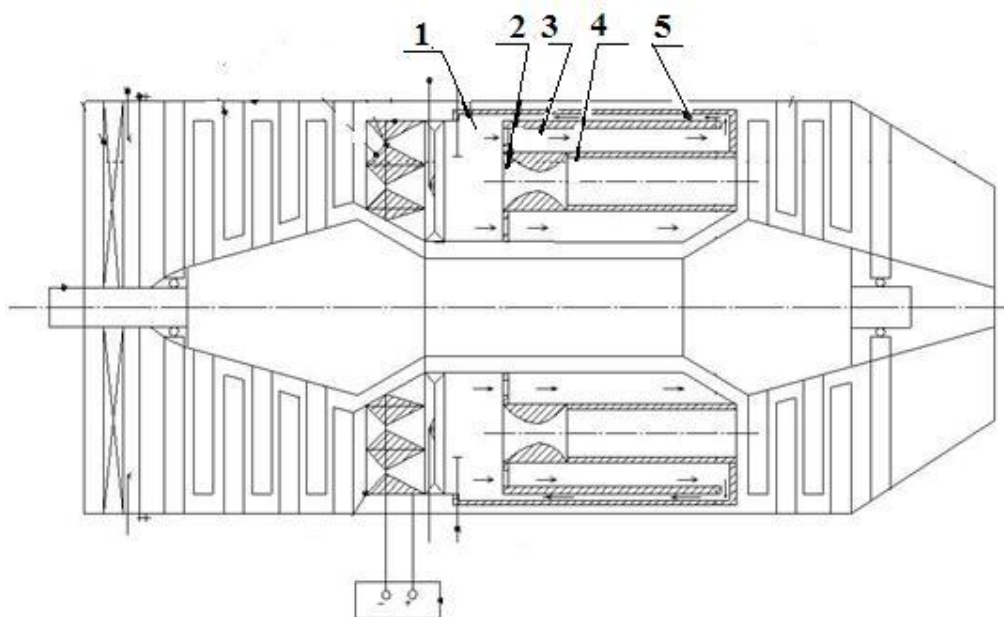


Рис. 5. Газотурбинный двигатель:

1 – камера сгорания, 2 – сверхзвуковое сопло, 3 – внешняя труба,
4 – внутренняя труба, 5 – канал рециркуляции дозвукового потока

Рассмотрена возможность повышения экономичности газовых турбин путем разработки новых способов охлаждения с помощью программных продуктов. Преимуществом разрабатываемого программно-информационного комплекса является то, что благодаря учету влияния

на граничные условия теплообмена реального распределения температуры по поверхности лопатки и ее изменения во времени, а также особенностей обменных процессов в межлопаточных каналах обеспечивается наибольшая точность расчета теплового состояния по сравнению с другими программными продуктами. А использование газодинамической температурной стратификации для тепловой защиты элементов газовых турбин имеет большие перспективы, поскольку применение дисперсного рабочего тела и оптимизация параметров потока позволяет интенсифицировать тепловой поток в 7 и более раз по сравнению с однородным. Исследования выполнены при поддержке грантом Президента РФ по проекту МД-1576.2014.8, гранта победителя Всероссийского конкурса молодежных проектов (приказ Федерального агентства по делам молодежи №192 от 24.12.2014 г.)

Список литературы

1. Нагога Г.П. Эффективные способы охлаждения лопаток высокотемпературных газовых турбин: учебное пособие. – М.: Изд-во МАИ, 1996. – 100 с.
2. Копелев С.З., Слитенко А.Ф. Конструкция и расчет систем охлаждения ГТД. – Х.: «Основа», 1994, 121 с.
3. Волков К.Н., Емельянов В.Н. Течения и теплообмен в каналах и вращающихся полостях. – М.: «Физмалит», 2010. – 480 с.
4. Ковальногов Н.Н., Федоров Р.В., Генералов Д.А. Исследование теплового состояния лопаток турбомашин с помощью программно-информационного комплекса // Известия МГТУ «МАМИ»: М., МГТУ «МАМИ». – № 4 (22). – 2014. – Т. 1. – С. 22–27.
5. Ковальногов Н.Н. Пограничный слой в потоках с интенсивными воздействиями. – Ульяновск: УлГТУ, 1996. – 245 с.
6. Ковальногов В.Н., Федоров Р.В., Цветова Е.В., Петров А.В. Математическое моделирование и исследование газодинамической температурной стратификации в дисперсном потоке // Автоматизация процессов управления, 2013. – № 1. – С. 40–46.

DEVELOP EFFECTIVE WAYS TO IMPROVE THE EFFICIENCY OF THE GAS TURBINE

V.N. KOVALNOGOV*, R.V. FEDOROV*, D.A. GENERALOV*

*FSBEI HPE «Ulyanovsk State Technical University», Ulyanovsk

Annotation. The ways to improve the efficiency of modern gas turbines, including through the development of software and information systems for the analysis of the thermal state of turbomachinery blades and use of the latest research in the field of gas dynamics.

Key letters: cooling blades of turbomachines, software and information complex, gas-dynamic temperature stratification.

УДК 628.477

РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩАЯ ТЕХНОЛОГИЯ УТИЛИЗАЦИИ «ЗАМАЗУЧЕННОГО» ШЛАМА ХИМВОДООЧИСТКИ ТЭС

Л.А. НИКОЛАЕВА, Д.А. ХАМЗИНА

ФГБОУ ВПО «Казанский государственный энергетический университет»,
г. Казань

Аннотация. Рассматривается метод утилизации замазученного шлама химводоочистки ТЭС. Представлена схема утилизации «замазученного шлама» ТЭС путем ее сжигания с возможной регенерацией тепла. Экспериментально определена зольность замазученного шлама ТЭС, проведен элементный анализ образца на С, Н, N, S рентгенофлуоресцентным методом.

В работе мы рассмотрена возможность вторичной утилизации замазученного шлама - его сжигание с возможной регенерацией тепла. Предлагается брикетировать замазученный шлам для более удобного использования и хранения.

Ключевые слова: схема утилизации, шлам химводоочистки, нефтепродукты сточных вод, замазученный шлам, зольность, элементный состав, брикетирование.

В настоящее время один из самых масштабных потребителей ископаемых ресурсов является энергетика.

Во всем мире для современной энергетики стоит проблема утилизации промышленных отходов, что способствует созданию технологий, обеспечивающих максимальную утилизацию промышленных отходов на ТЭС. Существует проблема утилизации такого отхода как шлам ХВО. Традиционно этот отход сбрасывается в шламонакопители, усугубляя экологическую ситуацию на прилегающих территориях электростанций.

Существует способ модернизации схемы очистки сточных вод – замена активированного угля и антрацита шламом ХВО на последней ступени очистки. Это позволит снизить затраты на очистку сточных вод ТЭС от нефтепродуктов, так как шлам ХВО образуется в цикле самой станции и не требует дополнительных затрат на его приобретение.

В одной из ранних работ [1] авторами была предложена ресурсосберегающая технология очистки сточных вод – замена

активированного угля и антрацита шламом ХВО на последней ступени очистки. Это позволит снизить затраты на очистку сточных вод ТЭС от нефтепродуктов, так как шлам ХВО образуется в цикле самой станции и не требует дополнительных затрат на его приобретение. При низкой начальной концентрации нефтепродуктов в сточных водах возможно использование сырой эмульсии шлама в качестве коагулянта в камере предварительного хлопьеобразования.

Результаты исследования кинетики процесса адсорбции показывают, что сорбционная способность шлама реализуется в течение первого часа контакта со сточной водой и достигает максимальной величины 5,7 г/г, когда наибольшее влияние на скорость сорбции оказывает интенсивность внешнего массопереноса.

Существует множество возможных путей утилизации шлама:

- В качестве наполнителя в резинотехнические смеси.
- В качестве сырья для получения сульфатсодержащих вяжущих веществ.
- В качестве минерального удобрения для сельскохозяйственных угодий.
- В качестве адсорбента нефтепродуктов сточных вод ТЭС.
- В качестве добавки к асфальтобетонам.
- В качестве хроматического неорганического пигмента для пентафталиеновых эмалей и так далее.

Также в ранней работе [2] на основе шлама разработан гидрофобный сорбент для очистки поверхностных водных источников от нефтяных загрязнений. Гидрофобизация проводилась с помощью вещества «Силор», получаемое деструкцией отходов силаксановых каучуков. Размер частиц составляет 0,01–0,09 мм. Нефтеемкость сорбента – 1,3–1,5 г/г.

Состав нефтесодержащих сточных вод характеризуется сложностью, большим разнообразием и зависит от вида, назначения, технологии производства. Сама по себе нефть и ее производные – исключительно сложная смесь различных химических соединений, среди которых наиболее многочисленными являются углеводороды (50–98 % от общего состава). Основная особенность нефтезагрязнений в стоках – меньшая плотность по сравнению с водой (бензин 0,7–0,76 г/см³, дизельное топливо 0,8–0,9, реактивное топливо 0,8–0,85, мазут 0,94–1 г/см³) и низкая растворимость в воде. Для мелких фракций нефти (бензинов) она не превышает 20–30 мг/л, для керосинов – 70–90 мг/л, а для тяжелых фракций – практически равна нулю. В сточных водах нефтепродукты по дисперсному составу могут быть в свободном, эмульгированном

и растворенном состоянии. Объемы нефтесодержащих стоков зависят от мощности предприятий.

Все твердые топлива являются продуктами растительного происхождения. Растения, произраставшие в давно прошедшие геологические периоды, скапливались в виде огромных залежей, составляющих современные запасы горючих ископаемых. В настоящее время человек располагает различными твердыми топливами: древесиной, полностью сохраняющей состав живой растительной ткани, торфом, в котором растительная ткань уже значительно изменилась, бурыми и каменными углями, в которых состав растительной ткани почти полностью изменился – она обогатилась углеродом и уплотнилась. В антраците – наиболее древнем горючем ископаемом – растительная ткань подверглась еще большим изменениям и превратилась в почти чистый углерод.

Измерена зольность замазученного шлама – 31,5 %. Низшая теплота сгорания (Q^P_H) замазученного шлама, определенная экспериментальным путем в лаборатории топлива и масла Казанской ТЭЦ-1, составила 5480,4 ккал/кг при расчетной влажности 3,5 %. Можно сделать вывод о том, что теплота сгорания замазученного шлама приближается к теплоте сгорания каменных углей.

Для аналитических расчетов теплоты сгорания всех видов твердых топлив наибольшее применение имеет формула Д.И. Менделеева (1897 г.):

$$Q_{PH} = 339,13 \cdot \%C^P + 1029,95 \cdot \%H^P - 108,86 (\%O^P - \%S^P) - 25,12 \cdot \%W^P, \text{ кДж/кг (1)}$$

Далее был проведен элементный анализ образца на С, Н, N, S, который показал: содержание углерода составляет 29,01 %, содержание водорода 2,27 %, содержание азота 0,18 % и серы – следы.

Полученный отход (замазученный шлам) предлагается брикетировать для более удобного хранения путем обезвоживания замазученного шлама и последующего его прессования при давлении 30–35 МПа.

Замазученный шлам имеет хорошие теплотворные способности, имеет низкую себестоимость, так как является отходом производства и его можно сжигать на объектах ТЭК и полезно использовать получаемое при этом тепло.

Список литературы

1. Недзвецкая (Исхакова) Р.Я. Очистка сточных вод промышленных предприятий шламом водоподготовки ТЭС с возможностью его вторичной утилизации / Тинчуринские чтения: материалы; под ред. Э.Ю. Абдуллазянова. – Казань: КГЭУ, 2012. – Т. 2. – С. 147.
2. Николаева Л.А., Голубчиков М.А. Влияние природы гидрофобизатора на сорбционную емкость шлама осветлителей ТЭС // Вода: химия и экология. – 2011. – № 10. – С. 54–57.
3. Николаева Л.А., Хамзина Д.А. Использование шлама ХВО в качестве добавки к твердому топливу на ТЭС / Тинчуринские чтения: материалы; под ред. Э.Ю. Абдуллазянова Казань: КГЭУ, 2012. – Т. 2.
4. Николаева Л.А., Хамзина Д.А. Исследование замазученного шлама ХВО на ТЭС в качестве вторичного материального ресурса / XVII аспирантско-магистерский научный семинар, посвященный Дню энергетика. – Казань: КГЭУ, 2013.

ALTERNATIVE TECHNOLOGY UTILIZATION «POLLUTED» CHEMICAL WATER TREATMENT SLUDGE TPP

L.A. NIKOLAEVA, D.A. KHAMZINA
FSBEI NPE «Kazan power-engineering university», Kazan

Annotation. The method of disposal of contaminated sludge TPP chemical water treatment. A scheme for utilization of «polluted sludge» TPP by its incineration with possible heat recovery. Experimentally determined polluted sludge ash thermal power plants, elemental analysis conducted on the sample C, H, N, S X-ray fluorescence method.

In this paper we consider the possibility of secondary recycling of polluted sludge - burning it with possible heat recovery. It is proposed to briquette oiled sludge for easy use and storage.

Keywords: recycling scheme, chemical water treatment sludge, oil wastewater oiled sludge, ash, elemental composition, briquetting.

УДК 66.074

ИССЛЕДОВАНИЕ ТУРБУЛЕНТНОЙ МИГРАЦИИ ЧАСТИЦ НА КАПЛЮ В ПОЛЫХ РАСПЫЛИВАЮЩИХ ГАЗОСЕПАРАТОРАХ

А.Г. ЛАПТЕВ, А.Р. ИСХАКОВ

ФГБОУ ВПО «Казанский государственный энергетический университет»,
г. Казань

Аннотация. В работе рассмотрена проблема очистки газовых сред от твердой фазы. Получена зависимость для определения эффективности полых распыливающих газосепараторов. Исследована турбулентная миграция частиц на каплю. Представлена расчетная формула определения эффективности сепарации. Результаты исследования могут найти применение при проектировании или модернизации аппаратов газоочистки.

Ключевые слова: распыливающий газосепаратор, очистка газовой фазы, турбулентная миграция, капля, твердые частицы.

В настоящее время практически все отрасли топливно-энергетического комплекса при производстве и распределении энергии используют в своих технологических процессах газообразные среды. При этом зачастую газы являются гетерогенными по своему составу, содержат твердые дисперсные частицы. Присутствие твердой фазы оказывает негативное воздействие на работу оборудования, состояние трубопроводов, так как повышаются энерго- и ресурсозатраты на проведение процессов.

Для повышения энергоресурсоэффективности необходимо проектирование аппаратов газоочистки с учетом предварительного моделирования процессов. При математическом моделировании процессов в распыливающих полых газосепараторах необходимо учитывать механизм турбулентной миграции, который имеет существенное значение при очистке газов от мелкодисперсной фазы.

В данной работе представлено моделирование турбулентной миграции частиц для полых распыливающих газосепараторов.

Согласно исследованиям Медникова Е.П.[5] и др. при теоретическом анализе всех форм движения аэрозольных частиц в турбулентном потоке обычно принимается следующие предположения.

•Диаметр частиц $d_{\text{ч}}$ мал по сравнению с масштабом несущих их пульсационных вихрей с масштабом ℓ :

$$d_{\text{ч}} \ll \ell.$$

При таком предположении каждая частица совершает движение, оставаясь в пределах несущего вихря. Отмеченному условию удовлетворяют частицы любой дисперсности.

•Обтекания частиц происходит при

$$\text{Re}_d = |U_{gp}| d_{\text{ч}} / \nu_{\text{г}} < 1,$$

где $U_{gp} = U_{\infty} - U_p$ – скорость обтекания частиц турбулентными пульсациями; $\nu_{\text{г}}$ – коэффициент кинематической вязкости газа, $\text{м}^2/\text{с}$.

•Частицы имеют форму близкой к сферической, а в случае сильного отклонения от сферы вводится коэффициент формы. Полидисперсность частиц аэрозоля рассматривается пофракционно.

•Среднее расстояние между частицами, определяемое по формуле:

$$S_m \approx 80 d_{\text{ч}} \left(\frac{\rho_{\text{ч}}}{c} \right)^{\frac{1}{3}},$$

где c – концентрация частиц, $\text{кг}/\text{м}^3$; $\rho_{\text{ч}}$ – плотность частиц, $\text{кг}/\text{м}^3$.

Кроме этого частицы:

- а) не стесняют движение друг друга в ходе взаимных перемещений;
- б) не соударяются, не коагулируют друг с другом;
- в) не оказывают ощутимого влияния на турбулентные характеристики среды.

Пределом концентраций частиц при выполнении данных условий, согласно экспериментальным данным Россетти и Пфедера, можно считать при концентрации $C \leq 200 \text{ г}/\text{м}^3$.

•Электростатические и другие силы не гидродинамической природы отсутствуют.

Рассмотрим движение газовой смеси, содержащей твердые частицы, по высоте цилиндрического канала (аппарата). Навстречу газу в противотоке движутся капли жидкости за счет силы тяжести.

Эффективность очистки за счет турбулентной миграции на каплю определяется следующим образом [5]:

$$\eta = 1 - \exp\left(-\frac{4u_t H}{w_{\text{к}} d_{\text{к}}}\right), \quad (1)$$

где u_t – коэффициент скорости переноса частиц турбулентной миграции; H – высота канала, м; w_k – относительная скорость капли, м/с; d_k – средний диаметр капли, м.

Значение u_t определяется по следующей зависимости:

$$u_t^+ = \frac{u_t}{u_*}, \quad (2)$$

где u_t^+ – безразмерный эквивалент скорости турбулентного осаждения; u_* – динамическая скорость, м/с.

Для расчета u_t^+ получено [5]:

$$u_t^+ = 7,25 \cdot 10^{-4} K \text{ при } K \leq 16,6, \quad (3)$$

$$u_t^+ = 0,2 \text{ при } K > 16,6, \quad (4)$$

$$K = \left[\frac{\tau_p u_*^2}{\nu_\Gamma} \left(1 + \frac{\tau_p u_*}{0,05 d_k} \right)^{-1} \right]^2, \quad (5)$$

где τ_p – время релаксации, с; ν_Γ – коэффициент кинематической вязкости газа, м²/с.

Время релаксации определяется по следующей формуле:

$$\tau_p = \frac{d_\text{ч}^2 \rho_\text{ч}}{18 \mu_\Gamma}, \quad (6)$$

где $d_\text{ч}$ – диаметр частицы, м; $\rho_\text{ч}$ – плотность вещества частицы, кг/м³; μ_Γ – коэффициент динамической вязкости газа, Па · с.

Среднюю динамическую скорость на капле найдем из приближенного выражения, полученного из уравнения баланса сил:

$$u_* = w_k \sqrt{\frac{\xi}{8}}, \quad (7)$$

где ξ – коэффициент гидравлического сопротивления капли [6].

$$\xi = \frac{24}{\text{Re}_k} + \frac{4}{\sqrt{\text{Re}_k}} + 0,4 \text{ при } \text{Re}_k \leq 10^3, \quad (8)$$

$$\xi = 0,44 \text{ при } \text{Re}_k > 10^3, \quad (9)$$

где $\text{Re}_k = \frac{w_k d_k}{\nu_\Gamma}$ – число Рейнольдса для капли.

Средняя скорость капли находится по формуле:

$$w_k = \sqrt{\frac{4(\rho_\text{ч} - \rho_\Gamma)gd_k}{3\rho_\Gamma\xi}}, \quad (10)$$

где ρ_Γ – плотность газа, кг/м^3 ; g – ускорение свободного падения, м/с^2 .

Выполнены расчеты осаждения частиц на одиночную каплю в воздухе. На рис. 1 представлена зависимость эффективности турбулентной миграции на каплю, рассчитанная по формуле (1), в зависимости от размера частиц. Исходные данные: $\nu_\Gamma = 1,5 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$; $H = 0,5 \text{ м}$; $d_k = 2,6 \cdot 10^{-3} \text{ м}$; $\text{Re}_k = 1400$ $\rho_\text{ч} = 10^3 \text{ кг/м}^3$; $d_\text{ч} = 10^{-6} \div 10^{-5} \text{ м}$.

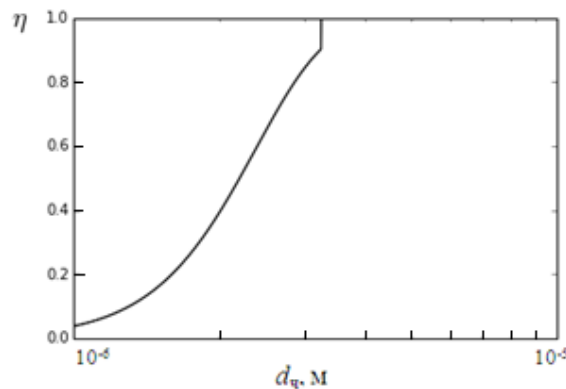


Рис. 1. Зависимость эффективности турбулентной миграции частиц на каплю от размера частиц при $\text{Re}_k = 1400$

Очевидно, что с увеличением диаметра частиц происходит повышение эффективности работы аппарата.

Рассмотрим полый противоточный распыливающий газосепаратор (рис. 2). Газ с твердыми частицами поступает в нижнюю часть аппарата и движется кверху. Навстречу ему движутся капли жидкости, которые захватывают частицы, распределенные в газе.

Эффективность сепарации в режиме идеального вытеснения определяется по следующей формуле:

$$\eta = \frac{C_H - C_K}{C_H} = 1 - \exp\left(-\frac{u_t F}{V_\Gamma}\right), \quad (11)$$

где F – площадь поверхности каплей, м^2 ; V_Γ – расход газа, $\text{м}^3/\text{с}$; C_H – начальная концентрация твердой фазы; C_K – конечная концентрация твердой фазы.

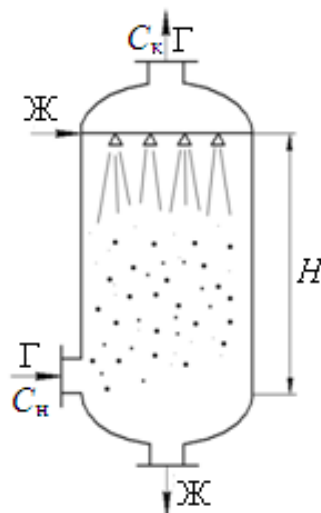


Рис. 2. Полый распыливающий газосепаратор

Межфазная поверхность связана с удельной поверхностью:

$$F = a_v S H, \quad (12)$$

где a_v – удельная поверхность каплей, $\text{м}^2/\text{м}^3$; S – площадь поперечного сечения сепаратора, м^2 .

Объемный расход запишем в виде:

$$V_\Gamma = w_\Gamma S, \quad (13)$$

где w_Γ – средняя скорость газа в аппарате, $\text{м}/\text{с}$.

Из (11), (12) и (13) получим эффективность газоочистки:

$$\eta = 1 - \exp\left(-\frac{u_t a_v H}{w_\Gamma}\right). \quad (14)$$

Удельная поверхность находится по известной формуле:

$$a_v = \frac{6q_{\text{ж}}}{d_{\text{к}} w_{\text{к}}}, \quad (15)$$

где $q_{\text{ж}}$ – плотность орошения аппарата, $\text{м}^3/(\text{м}^2\text{с})$.

На рис. 3 и 4 представлены зависимости эффективности сепарации твердых частиц от режимных параметров, рассчитанных по (14). Исходные данные: $d_{\text{к}} = 2,6 \cdot 10^{-3} \text{ м}$; $\rho_{\text{ч}} = 10^3 \text{ кг/м}^3$; $w_{\text{к}} = 8 \text{ м/с}$; $H = 0,5 \text{ м}$; $v_{\text{Г}} = 1,5 \cdot 10^{-5} \text{ м/с}$; $\rho_{\text{Г}} = 1,204 \text{ кг/м}^3$.

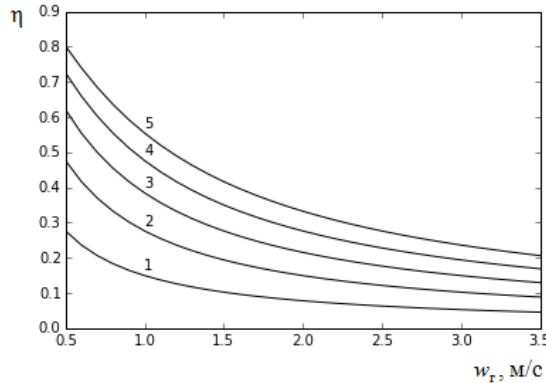


Рис. 3. Зависимость эффективности очистки от скорости газа для различных значений плотности орошения:

1 – $q_{\text{ж}} = 0,0028 \text{ м}^3/(\text{м}^2\text{с})$; 2 – $q_{\text{ж}} = 0,0056 \text{ м}^3/(\text{м}^2\text{с})$; 3 – $q_{\text{ж}} = 0,0083 \text{ м}^3/(\text{м}^2\text{с})$;
4 – $q_{\text{ж}} = 0,011 \text{ м}^3/(\text{м}^2\text{с})$; 5 – $q_{\text{ж}} = 0,014 \text{ м}^3/(\text{м}^2\text{с})$.

Видно, что чем больше плотность орошения, тем выше эффективность очистки, однако с увеличением скорости газа процесс сепарации ухудшается.

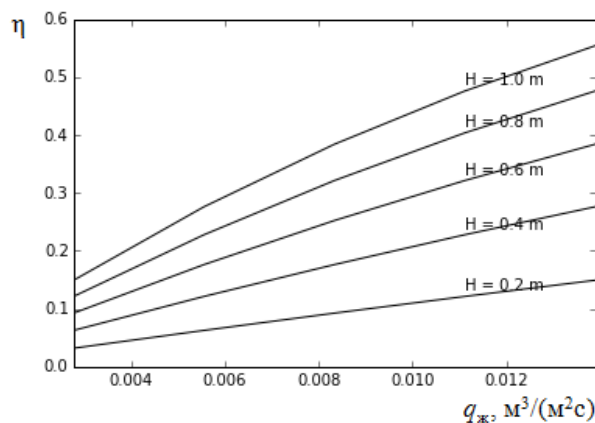


Рис. 4. Зависимость эффективности сепарации от плотности орошения для различной высоты аппарата

На рис. 4 видно, что чем выше значения плотности орошения и высоты сепаратора, тем выше эффективность очистки аппарата.

Выводы

Исследован подход моделирования очистки газов от тонкодисперсной фазы в противоточных аппаратах, построенный с использованием теории турбулентной миграции частиц. Представлено выражение для расчета эффективности турбулентной миграции частиц на каплю, а также результаты расчетов. Авторами получено выражение для расчета эффективности мокрой газоочистки от дисперсных частиц в полном распыливающем газосепараторе. Представленные выражения используются при проектировании промышленных аппаратов [7].

Список литературы

1. Лаптев А.Г., Башаров М.М., Исхаков А.Р. Вестник Казанского технологического университета. – 2012. – Т. 15. – № 14. – С. 96–99.
2. Исхаков А.Р., Башаров М.М. Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2014. – № 1–2. – С. 20–26.
3. Лаптев А.Г., Исхаков А.Р. Инженерно-физический журнал. – 2014. – Т. 87. – № 3. – С. 564–569.
4. Laptev A.G., Basharov M.M., Farakhov T.M., Iskhakov A.R. Advances in Chemical Engineering and Science (ACES). – 2014. – №. 4. – P. 143–148.
5. Медников Е.П. Турбулентный перенос и осаждение аэрозолей. – М.: Наука, 1980.
6. Броунштейн Б.И., Щеголев В.В. Гидродинамика, массо- и теплообмен в колонных аппаратах. – Л.: Химия, 1988.
7. Лаптев А.Г., Фарахов М.И. Вестник Казанского технологического университета. – 2011. – № 9. – С. 152–158.

INVESTIGATION OF TURBULENT MIGRATION OF PARTICLES INTO DROPS IN HOLLOW SPATTERING GAS SEPARATOR

A.G. LAPTEV, A.R. ISKHAKOV

FSBEI HPE «Kazan power-engineering university», Kazan

The problem of gaseous media purification from the solid phase problems is submitted. The aim of this study is to provide the dependencies for determining of hollow spray gas separators effect. Turbulent migration of particles to drop is studied. The calculated formula for determining the separation effect is submitted. Results of the study can be applied in the design of the packed gas purification devices.

Keywords: spattering gas separator, cleaning the gas phase, turbulent migration, drop, particulates.

УДК 628.336

ЭНЕРГОРЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ ПРИ ВТОРИЧНОМ ИСПОЛЬЗОВАНИИ КАРБОНАТНОГО ШЛАМА ТЭС И АКТИВНОГО ИЛА БИОЛОГИЧЕСКОЙ ОЧИСТНОЙ СТАНЦИИ

Л.А. НИКОЛАЕВА, Р.Я. ИСХАКОВА, Г.М. ЗАРИПОВА
ФГБОУ ВПО «Казанский государственный энергетический университет»,
г. Казань

Аннотация: В материалах рассмотрены вопросы энергоресурсосбережения при использовании активного ила – осадка биологической очистной станции ОАО «Казанский завод синтетического каучука» и шлама водоподготовки ТЭС в качестве дополнительного и альтернативного топлива на Казанской ТЭЦ-1.

Установлено, что введение шлама позволяет повысить эффективность механического обезвоживания избыточного активного ила.

Ключевые слова: энергоресурсосбережение, утилизация, отход, вторичный материальный ресурс, обезвоживание избыточного активного ила.

На современном этапе развития промышленности комплексное использование отходов производства в качестве вторичных материальных ресурсов является актуальной задачей. При этом происходит энерго- и ресурсосбережение за счет экономии сырьевых, топливно-энергетических и материальных ресурсов, которое обусловлено потребностями народного хозяйства.

На ТЭС образуется значительное количество отходов производства. Шлам водоподготовки является продуктом процессов известкования и коагуляции при очистке природной воды в осветлителях. Шлам осветлителей не является токсичным и относится к V классу опасности для окружающей природной среды, который подразумевает, что степень вредного воздействия шлама на окружающую среду очень низкая и экологическая система при его внесении практически не нарушена. Несмотря на отсутствие его вредного воздействия, утилизация шлама является приоритетной проблемой для ТЭС, так как накопление шлама происходит в течение длительного периода с учетом значительного расхода природных вод, что приводит к переполнению шламонакопителей на многих станциях.

Ранее авторами [1] разработан и предложен перспективный метод биосорбционной очистки сточных вод при участии микроорганизмов активного ила с использованием карбонатного шлама водоподготовки ТЭС в качестве сорбционного материала. Экспериментальные исследования проведены с использованием сточных вод и активного ила биологической очистной станции ОАО «Казанский завод синтетического каучука». При этом происходит повышение эффективности биологической очистки по основным показателям: химическое потребление кислорода (ХПК), биологическое потребление кислорода пятисуточное (БПК₅), концентрация аммонийного азота и фосфат-ионов.

При внедрении предлагаемой биосорбционной технологии очистки сточных вод Казанского завода синтетического каучука шламом ТЭС возникает вопрос, связанный со вторичной утилизацией смешанного осадка. Отработанный в процессе биосорбции осадок выносится во вторичные отстойники, после осаждения в которых возникает проблема его дальнейшего использования. Осадок, полученный после вторичных отстойников, представляет собой избыточный активный ил и шлам, покрытый биопленкой микроорганизмов активного ила.

Перспективным методом вторичной утилизации полученного осадка представляется его сжигание с возможностью регенерации тепла и использования полученной золы в качестве адсорбента при очистке дымовых газов ТЭС.

Одной из важнейших проблем, связанных с утилизацией избыточного активного ила, является то, что избыточный активный ил представляет собой труднофильтруемую суспензию высокой влажности, плохо поддающуюся обезвоживанию. Это обусловлено наличием в активном иле связанной влаги, которая образует гидратную оболочку на поверхности твердых частиц, препятствует их укрупнению и дальнейшему осаждению.

Перспективным в настоящее время является механическое обезвоживание осадка. Одним из современных методов механического обезвоживания осадка является центрифугирование [2–4].

Для оценки повышения влагоотдачи активного ила при введении карбонатного шлама проведены лабораторные исследования на центрифуге СМ-6М, в которой разделение дисперсной и жидкой фазы происходит осаждением взвешенных частиц под действием центробежных сил. Время центрифугирования составляло 1, 2 и 3 минуты. Скорость вращения центрифуги составляла от 500 до 1500 об/мин.

В работе центрифугированию подвергались избыточный активный ил (ИАИ), смесь, состоящая из ИАИ и необработанного шлама и смесь, ИАИ и прокаленного карбонатного шлама ТЭС в различных пропорциях. Предварительно ИАИ интенсивно перемешивался с необработанным и прокаленным карбонатным шламом в различных соотношениях в течение 5 минут. Затем смешанный осадок помещался в цилиндры центрифуги объемом 10 мл и проводилось центрифугирование при различных условиях.

Для расчета определения влагоотдачи осадка использовался индекс центрифугирования, который показывает степень обезвоживания осадков в поле центробежных сил. Удовлетворительным значением обезвоживания осадков считается индекс центрифугирования $U \leq 6-8$. Результаты исследования представлены на рис. 1–3.

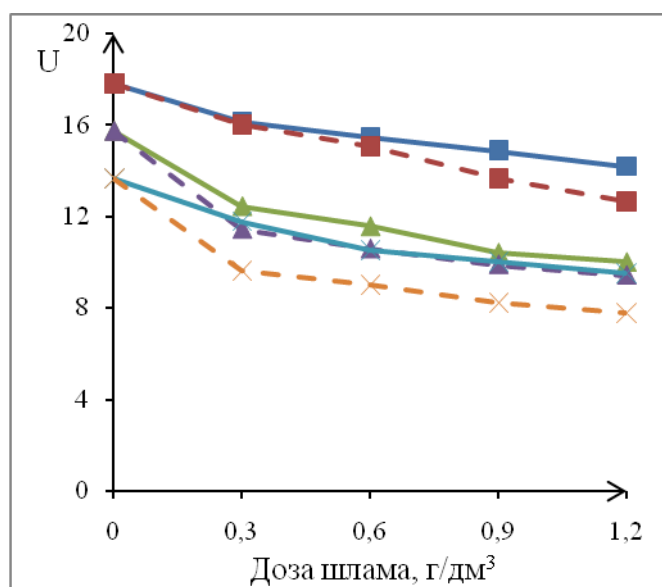


Рис. 1. Зависимость значения индекса центрифугирования от вводимой дозы шлама (500 об/мин).

(Время центрифугирования: ■ — 1 мин, ▲ — 2 мин, × — 3 мин; — карбонатный шлам; --- прокаленный карбонатный шлам)

Как видно из рис.1 удовлетворительное значение индекса центрифугирования ($U = 7,75$) при вращении ротора со скоростью 500 об/мин достигается при введении $1,2 \text{ г/дм}^3$ прокаленного карбонатного шлама при центрифугировании в течение 3 минут.

Как видно из рис. 2, верхний порог удовлетворительного значения индекса центрифугирования ($U = 7,95$) достигается при введении необработанного карбонатного шлама минимальной дозой $0,6 \text{ г/дм}^3$ при

центрифугировании осадка со скоростью 1000 об/с в течение 1 мин и при введении $0,3 \text{ г/дм}^3$ прокаленного карбонатного шлама в аналогичных условиях, в то время как центрифугирование только ИАИ при тех же условиях имеет гораздо больший индекс ($U = 10,05$) и является неэффективным.

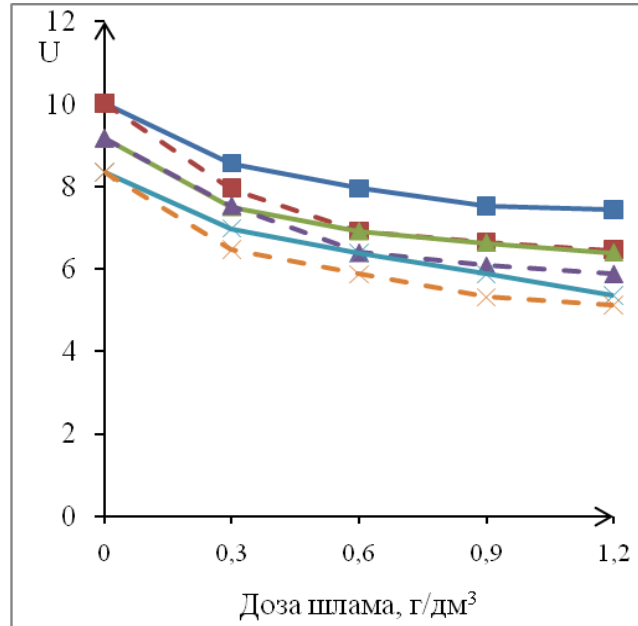


Рис. 2. Зависимость значения индекса центрифугирования от вводимой дозы шлама (1000 об/мин) (Время центрифугирования: ■ – 1 мин, ▲ – 2 мин, × – 3 мин; — карбонатный шлам; --- прокаленный карбонатный шлам)

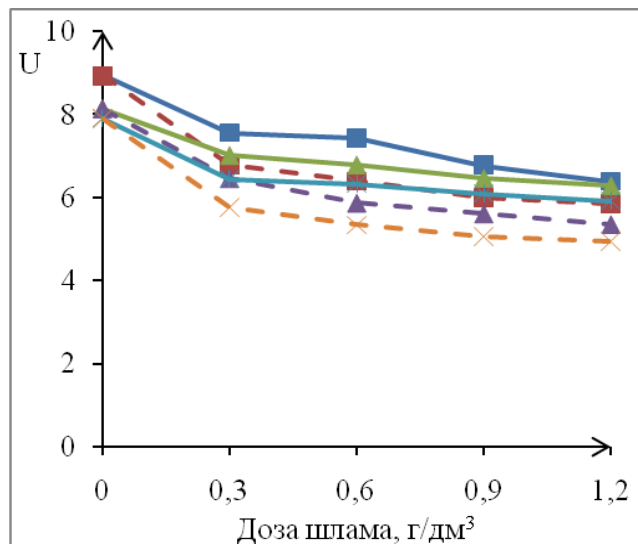


Рис. 3. Зависимость значения индекса центрифугирования от вводимой дозы шлама (1500 об/мин) (Время центрифугирования: ■ – 1 мин, ▲ – 2 мин, × – 3 мин; — карбонатный шлам; --- прокаленный карбонатный шлам)

Как видно из рис. 3, индекс центрифугирования имеет меньшие значения при введении необработанного и прокаленного шлама. Установлено, что с увеличением дозы карбонатного шлама снижается значение индекса центрифугирования. Удовлетворительное значение индекса центрифугирования ($U = 7,91$) при обработке чистого ИАИ без добавления карбонатного шлама достигается при 1500 об/с в течение 3 минут, что является наиболее энергозатратным процессом.

Таким образом, при одинаковых условиях проведения эксперимента было получено, что за счет введения карбонатного шлама происходит повышение влагоотдачи избыточного активного ила и снижаются энергетические затраты на проведение процесса. Влажность ИАИ после центрифугирования составляет 84%, в то время как влажность смешанного осадка (ИАИ и необработанного карбонатного шлама) колеблется в пределах 74–71 % (в зависимости от дозы вводимого шлама и условий проведения эксперимента), влажность ИАИ при введении прокаленного шлама – до 69 %.

Для улучшения водоотдающих свойств ИАИ предлагается проводить химическую обработку осадка путем добавления карбонатного шлама, который выступает в качестве минерального коагулянта. Введение карбонатного шлама позволяет нарушать агрегативную устойчивость суспензии ИАИ за счет предотвращения агломерации активного ила путем разрыва гидратной оболочки, обволакивающей частицы ила. При центрифугировании активного ила совместно с карбонатным шламом происходит разрыв прочных структурных связей, позволяющий производить отделение коллоидно-связанной влаги. Таким образом, происходит перераспределение связанной влаги ИАИ и увеличивается содержание свободной воды в суспензии. Значительное содержание Ca^{2+} формирует жесткую механическую структуру осадка, способствует электростатическому взаимодействию с АИ, который в интервале $4 < \text{pH} < 9$ рассматривается как отрицательно заряженный [5].

При этом введение прокаленного карбонатного шлама имеет более высокую эффективность влагоотдачи ИАИ за счет увеличения порового пространства карбонатного шлама, при этом снижается общий объем уплотненной массы ИАИ.

Заключение. Карбонатный шлам, являющийся отходом производства ТЭС, выступает не только как сорбционный материал, но и в качестве минерального коагулянта и может быть использован для повышения влагоотдающих свойств суспензии избыточного активного ила. При совместном центрифугировании повышается эффективность

центрифугирования за счет разрыва гидратных оболочек частиц активного ила. Карбонатный шлам в этом случае выступает присадкой для улучшения влагоотдающих свойств активного ила и позволяет снизить влажность осадка более чем на 10 %. Введение прокаленного карбонатного шлама повышает эффективность водоотдачи ИАИ по сравнению с необработанным карбонатным шламом на 2–6 %.

Список литературы

1. Николаева Л.А. Исследование кинетики биосорбционной очистки сточных вод промышленных предприятий шламом ХВО ТЭС / Николаева Л.А., Исхакова Р.Я. // Энергосбережение и водоподготовка. – 2013. – № 6. – С. 21–23.
2. Воронов Ю.В., Яковлев С.В. Водоотведение и очистка сточных вод. – М.: Изд-во АСВ, 2006. – 704 с.
3. Малиновская Т.А., Кобринский И.А., Кирсанов О.С., Рейнфарт В.В. Разделение суспензий в химической промышленности. – М.: Химия, 1983. – 264 с.
4. Жужиков В.А. Фильтрация. Теория и практика разделения суспензий. – М.: Химия, 1981. – 440 с.
5. Kopp J. Prediction of full-scale dewatering results by determining the water distribution of sewage sludge / Kopp J., Dichtl N. // Water Science & Technology. 2001. Vol. 43, no. 9. p. 135–143.

ENERGY AND RESOURCE SAVING BY CARBONATE SLUDGE AND ACTIVATED SLUDGE REUSE

L.A. NIKOLAEVA, R.YA. ISKHAKOVA⁶², G.M. ZARIPOVA
FSBEI NPE «Kazan power-engineering university», Kazan

Abstract: The problems of using activated sludge - sludge of biological treatment plant from JSC "Kazan Synthetic Rubber Plant" and heat power stations sludge as an additional and alternative fuels is reviewed. It was investigated that the dosing of the sludge improves the efficiency of excess activated sludge mechanical dewatering.

Key words: energy and resource saving, reuse, waste, secondary materials, dewatering of activated sludge.

УДК 61.021.3/4

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ И ТЕПЛОМАССОБМЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЛЕНОЧНЫХ БЛОКОВ ОРОСИТЕЛЕЙ В ГРАДИРНЯХ

Е.А. ЛАПТЕВА, Л.М. ИШМУРАТОВА, А.Г. ЛАПТЕВ
ФГБОУ ВПО «Казанский государственный энергетический университет»,
г. Казань

Аннотация. Выполнено развитие подхода комплексной совместной оценки тепломассообменных и энергетических характеристик для блоков оросителей градирен, работающих в пленочном режиме. Рассмотрены несколько видов регулярных насадок и выполнены расчеты энергетического коэффициента. Сформулированы условия наиболее целесообразного тепломассообменного режима.

Ключевые слова: энергетический коэффициент, градирни, тепломассообмен, насадки

В данной работе выполнено развитие подхода [1] комплексной совместной оценки тепломассообменных и энергетических характеристик для блоков оросителей градирен, работающих в пленочном режиме. При массообмене для этого используется комплекс, полученный на основе выражения Ануфьева В.И.

$$E = \frac{\Delta p h_{ог}}{H}, \quad (1)$$

где, Δp – перепад давления газа при прохождении блока оросителей (насадки), Па; $h_{ог}$ – высота единиц переноса, м; H – высота блока оросителей, м.

Чем меньше значение E (1), тем энергетически эффективнее работает аппарат. Аналогичный комплекс записываем и для теплообмена.

Формула для $h_{ог}$, как известно, имеет вид

$$h_{ог} = \frac{G}{\beta_{г} S a_v \psi_w \rho_{г}}, \quad (2)$$

где G – массовый расход газа, кг/с; $\beta_{г}$ – средний коэффициент массоотдачи в газовой фазе, м/с; a_v – удельная поверхность насадки, м²/м³; ψ_w –

коэффициент смачиваемости поверхности насадки; S – площадь поперечного сечения аппарата (без учета насадки), м^2 ; ρ_r – плотность газа, $\text{кг}/\text{м}^3$.

Коэффициент смачиваемости поверхности для регулярных насадок

$$\psi_w = \frac{U}{0,0005 + 0,8U},$$

где U – удельная плотность орошения, $\text{м}^3/(\text{м}^2\text{с})$, (при $U > 2,6 \cdot 10^3$, $\psi_w = 1$).

В уравнении (1) запишем перепад давления, используя выражение Дарси-Вейсбаха, а в формуле (2) $G/S\rho_r = w_r$ – средняя скорость газа без учета насадки, $\text{м}/\text{с}$.

Тогда выражение (1) получает вид

$$E = \xi_{\text{ор}} \frac{\rho_r w_r^3}{8 \varepsilon_{\text{св}} \beta_r \psi_w}, \quad (3)$$

где $\xi_{\text{ор}}$ – коэффициент гидравлического сопротивления орошаемой насадки.

Если в выражении (3) использовать понятие объемного коэффициента массоотдачи $\beta_{\text{vx}} = \beta_r a_v \psi_w \rho_r$, то получим

$$E = \xi_{\text{ор}} \frac{\rho_r^2 w_r^3}{2 d_y \beta_{\text{vx}}}, \quad (4)$$

где $d_y = 4 \varepsilon_{\text{н}} \bar{a} / a_v$ – эквивалентный диаметр насадки, м ; $\varepsilon_{\text{св}}$ – удельный свободный объем, $\text{м}^3/\text{м}^3$.

Естественно, выражения (1), (3) и (4) дают одинаковые результаты.

Объемные коэффициенты массоотдачи β_{vx} ($\text{кг}/\text{м}^3\text{с}$) находятся экспериментально для каждого блока оросителей и обобщаются в виде зависимости

$$\beta_{\text{vx}} = A \Gamma^m \lambda^n, \quad (5)$$

где Γ – плотность орошения, $\text{м}^3/(\text{м}^2\text{ч})$; $\lambda = G/L$; G, L – массовые расходы воздуха и воды, $\text{кг}/\text{с}$; A, m, n – эмпирические коэффициенты.

Для определения средних значений коэффициентов массоотдачи можно использовать теорию пограничного слоя или обобщение гидродинамической аналогии. При противотоке пленки жидкости и газа для регулярных насадок получено [2]

$$\text{Sh}_\Gamma = 0,158 \text{ Re}_\Gamma^{0,85} \left(\xi_{\text{оп}}/8 \right)^{0,429} \text{Sc}_\Gamma^{0,33} \quad (6)$$

и для нерегулярных насадок

$$\text{Sh}_\Gamma = 0,342 \text{ Re}_\Gamma^{0,643} \left(\xi_{\text{оп}}/2 \right)^{0,214} \text{Sc}_\Gamma^{0,33}, \quad (7)$$

где $\text{Sh}_\Gamma = \beta_\Gamma d_3 / D_\Gamma$ – число Шервуда; D_Γ – коэффициент диффузии компонента, $\text{м}^2/\text{с}$; $\text{Re}_\Gamma = w_\Gamma d_3 / \nu_\Gamma \varepsilon_{\text{св}}$ – число Рейнольдса; ν_Γ – коэффициент кинематической вязкости газа, $\text{м}^2/\text{с}$; $\text{Sc}_\Gamma = \nu_\Gamma / D_\Gamma$ – число Шмидта.

Выражения (6) и (7) получены в рамках единого подхода [2] и их отличие заключается в том, что формула (6) получена при нахождении среднего касательного напряжения на межфазной поверхности из уравнения баланса сил, а выражение (7) – используя среднюю объемную скорость диссипации энергии газа.

Результаты расчетов коэффициентов массоотдачи по уравнениям (6) и (7) удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными для регулярных и нерегулярных насадок [2].

Количество тепла (Вт), переданного водой в воздух равно

$$Q = \beta_{\text{вх}} \Delta I_{\text{ср}} V_{\text{н}}, \quad (8)$$

где $\Delta I_{\text{ср}}$ – средняя разность энтальпий воздуха на входе и выходе слоя, Дж/кг; $V_{\text{н}}$ – объем насадочного слоя, м^3 .

При известном значении Q (8) для энергетической оценки можно использовать коэффициент Кирпичева $E' = Q/N$, N – мощность на подачу газа, Вт. В данном случае, чем больше E' , тем лучше тепломассообменные и энергетические характеристики.

Из выражения (8) следует, что при одинаковой движущей силе и объеме насадки необходимо добиваться максимального значения объемного коэффициента массоотдачи.

Рассмотрим несколько видов регулярных насадок [3] и выполним расчеты энергетического коэффициента (3).

1. Сетчатая насадка цилиндрической формы из полиэтилена. Удельная поверхность при плотной упаковке $a_v = 75 \text{ м}^2/\text{м}^3$; свободный объем $\varepsilon_{\text{св}} \approx 0,9$. Коэффициент гидравлического сопротивления

$$\xi_{\text{оп}} = 0,172 \left(\frac{64}{\text{Re}_\Gamma} + \frac{1,8}{\text{Re}_\Gamma^{0,08}} \right). \quad (9)$$

2. Регулярная металлическая насадка Инжехим (IRG) из гофрированных листов с перекрестным расположением гофров и шероховатой поверхностью. Удельная поверхность $a_v = 160 \text{ м}^2/\text{м}^3$, свободный объем $\varepsilon_{\text{св}} \approx 0,98$. Коэффициент гидравлического сопротивления

$$\xi_{\text{оп}} = 3,18 \text{Re}_\Gamma^{-0,12}. \quad (10)$$

3. Регулярная рулонная гофрированная насадка Инжехим с шероховатой поверхностью из металлической ленты. Удельная поверхность $a_v = 240 \text{ м}^2/\text{м}^3$, свободный объем $\varepsilon_{\text{св}} \approx 0,9$. Коэффициент гидравлического сопротивления

$$\xi_{\text{оп}} = 3,89 \text{Re}_\Gamma^{-0,294}. \quad (11)$$

4. Керамические кольца Рашига диаметром 100 мм, удельная поверхность $a_v \approx 60 \text{ м}^2/\text{м}^3$, свободный объем $\varepsilon_{\text{св}} \approx 0,72$. Коэффициент гидравлического сопротивления

$$\xi_{\text{оп}} = 9,2 \text{Re}_\Gamma^{-0,375}. \quad (12)$$

5. Деревянная хордовая насадка 10×100 мм, удельная поверхность $a_v = 65 \text{ м}^2/\text{м}^3$, свободный объем $\varepsilon_{\text{св}} = 0,68$. Коэффициент гидравлического сопротивления

$$\xi_{\text{оп}} = 6,64 \text{Re}_\Gamma^{-0,375}. \quad (13)$$

На рис. 1 и 2 даны результаты расчетов числа Шервуда и объемного коэффициента массоотдачи, а на рис. 3 – энергетического коэффициента.

Как видно из рис. 1, наибольшее значение числа Шервуда обеспечивают насадки 2 и 4, а объемный коэффициент массоотдачи (рис. 2) – насадки 2 и 3.

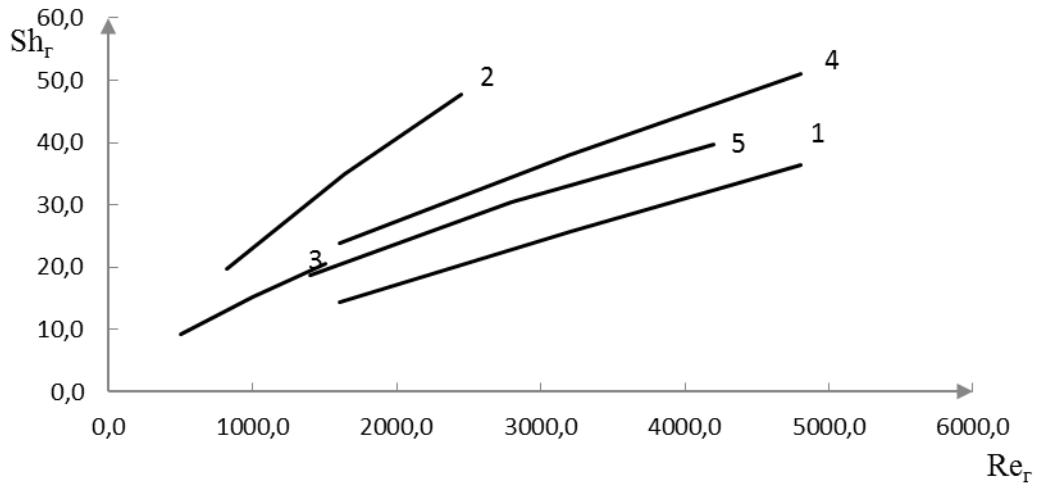


Рис. 1. Зависимость числа Шервуда от числа Рейнольдса:

1 – сетчатая насадка; 2 – регулярная металлическая насадка Инжехим (IRG) из гофрированных листов; 3 – регулярная рулонная гофрированная насадка Инжехим с шероховатой поверхностью из металлической ленты; 4 – керамические кольца Рашига; 5 – деревянная хордовая насадка

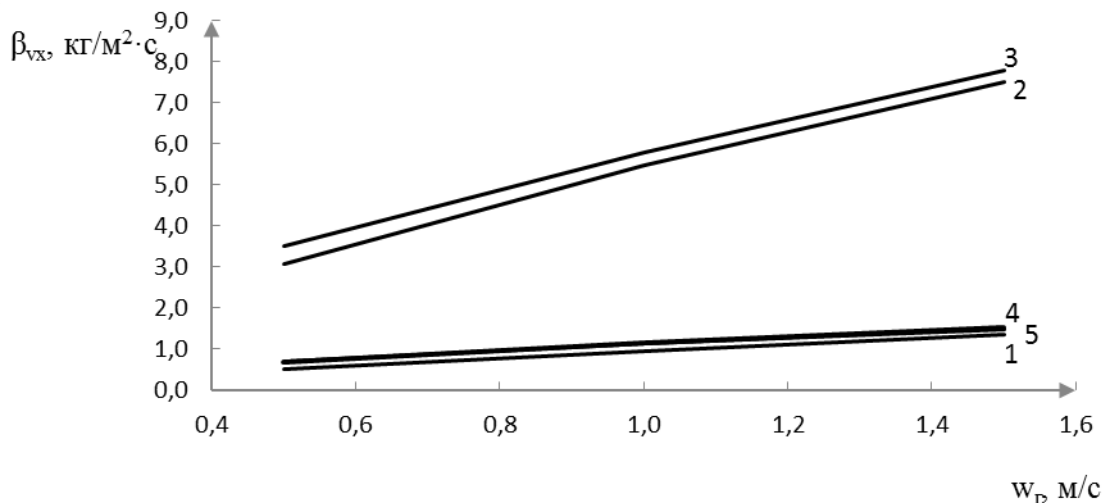


Рис. 2. Зависимость объемного коэффициента массоотдачи от скорости газа: 1 – сетчатая насадка; 2 – регулярная металлическая насадка Инжехим (IRG) из гофрированных листов; 3 – регулярная рулонная гофрированная насадка Инжехим с шероховатой поверхностью из металлической ленты; 4 – керамические кольца Рашига; 5 – деревянная хордовая насадка

Выражение (1) запишем, используя среднюю объемную скорость диссипации энергии газового потока в объеме газа оросителя $\bar{\varepsilon} = \Delta p S w_r [Sh(\varepsilon_{св} - \varepsilon_{ж})]^{-1}$, (Вт/м³).

В результате с учетом (2) получим

$$E = \frac{\bar{\varepsilon}(\varepsilon_{св} - \varepsilon_{ж})}{\beta_r a_v \psi_w}, \quad (14)$$

где $\varepsilon_{ж}$ – задержка жидкости в насадке, м³/м³.

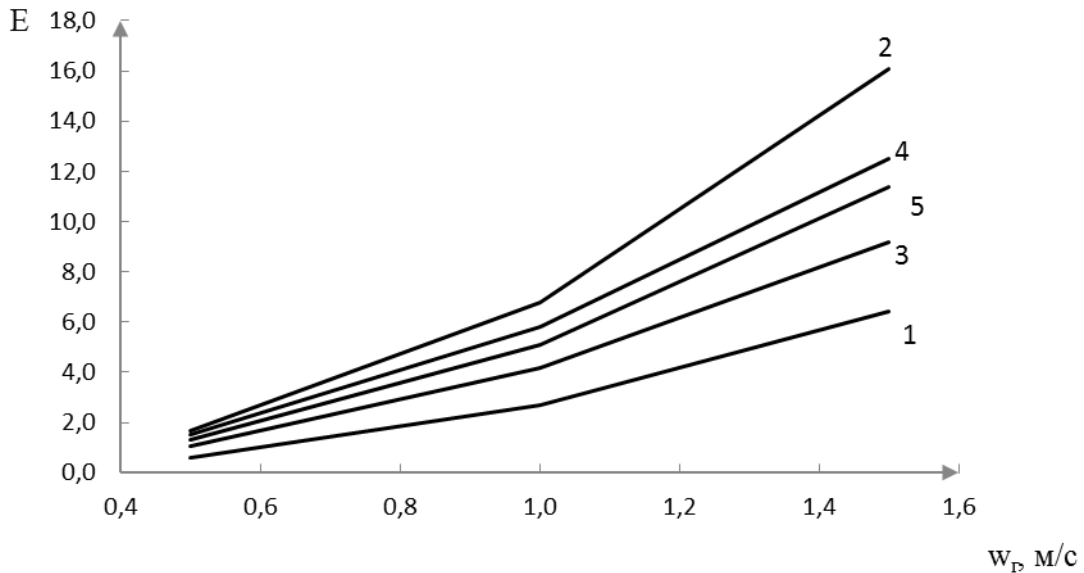


Рис. 3. Зависимость коэффициента E от скорости газа для различных насадок: 1 – сетчатая насадка; 2 – регулярная металлическая насадка Инжехим (IRG) из гофрированных листов; 3 – регулярная рулонная гофрированная насадка Инжехим с шероховатой поверхностью из металлической ленты; 4 – керамические кольца Рашига; 5 – деревянная хордовая насадка.

Из данного выражения следует, что энергетически целесообразный тепломассообменный режим организуется при минимальной диссипации энергии и максимальном объемном коэффициенте переноса. Конечно, это условие имеет некоторое противоречие, так как коэффициенты переноса тепла и массы зависят от скорости диссипации энергии.

С точки зрения энергетической эффективности наиболее эффективными являются насадки 1 и 3 (min E). Если эти насадки удовлетворяют по эффективности охлаждения воды (тепловой КПД), то 1 и 3 являются наиболее предпочтительными. Конечно, необходимо учитывать стоимость насадки, срок эксплуатации и другие технико-экономические характеристики, т.е. задача является многокритериальной.

Список литературы

1. Башаров М.М., Лаптев А.Г. Комплексная оценка тепломассообменных и энергетических характеристик контактных устройств // Надежность и безопасность энергетики. – 2014. – № 4. – С. 50–54.
2. Лаптев А.Г., Лаптева Е.А. Обобщение гидродинамической аналогии для различных условий обтекания поверхностей // Вестник КГТУ. – Т. 16. – 2013. – № 23. – С. 64–69.
3. Каган А.М., Лаптев А.Г., Пушнов А.С., Фарахов М.И. Контактные насадки промышленных тепломассообменных аппаратов. – Казань: Отечество, 2013. – 454 с.

ENERGY AND HEAT AND MASS TRANSFER CHARACTERISTICS OF FILM UNITS OF SPRINKLERS IN COOLING TOWERS

E.A. LAPTEVA, L.M. ISHMURATOVA, A.G. LAPTEV
FSBEI HPE «Kazan power-engineering university», Kazan

Annotation. Skill development of an integrated approach and a joint assessment of heat and mass transfer characteristics of the power units for sprinkler cooling towers working in film mode. Consider several types of regular nozzles and made calculations of the energy factor. The conditions most appropriate heat and mass transfer mode.

Key letters: power efficiency, cooling towers, heat and mass transfer, nozzles

УДК 621.10+536.5

ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ГЕНЕРАТОР

Р.С. КАШАЕВ, А.Г.Н. МАСИАБ, А. ХУСНИЯРОВ
ФГБОУ ВПО «Казанский государственный энергетический университет»,
г. Казань

Аннотация. Как одно из решений проблемы выработки электроэнергии от тепла потоков жидкостей промышленных производств для электропитания автономных датчиков и средств автоматики в круглосуточном режиме предлагаются устройства на термоэлементах, основанные на эффекте Зеебека – преобразовании перепада температур от фазовых переходов под действием тепла солнца, воды и воздуха.

Ключевые слова: выработка электроэнергии, эффект Зеебека, перепад температур, поток жидкости, фазовый переход.

Проблема получения электроэнергии от тепла потоков жидкостей и газов тепловых электростанций, окружающей среды, бросового тепла промышленных производств и создания возобновляемых источников электроэнергии для электропитания автономных датчиков, приборов, средств автоматики и бытовых объектов в круглосуточном режиме является актуальной. Истощение природных энергоресурсов (нефти, газа) и Федеральный закон № 261-ФЗ «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты РФ» стимулировало во всем мире развитие нетрадиционной энергетики.

Для питания автоматических датчиков в настоящее время широкое распространение получили электрогенераторы на фотоэлектрических элементах – солнечных панелях. Солнце излучает энергию как черное тело с температурой 6000 К в диапазоне $\lambda = 200\text{-}3000$ нм (рис. 1) [1]. При этом используемый фотоэлементами диапазон ультрафиолетовых длин волн $\lambda = 200\text{-}800$ нм охватывает 58 % всей энергетической эффективности солнечного излучения. В то же время 42 % энергии Солнца лежит в диапазоне длин волн $\lambda = 800\text{-}3000$ нм и недоступна для фотоэлементов, т.е. не используется. Это область теплового (инфракрасного) излучения, которая может быть использована термоэлектрическими элементами для эффективной генерации электрического тока.

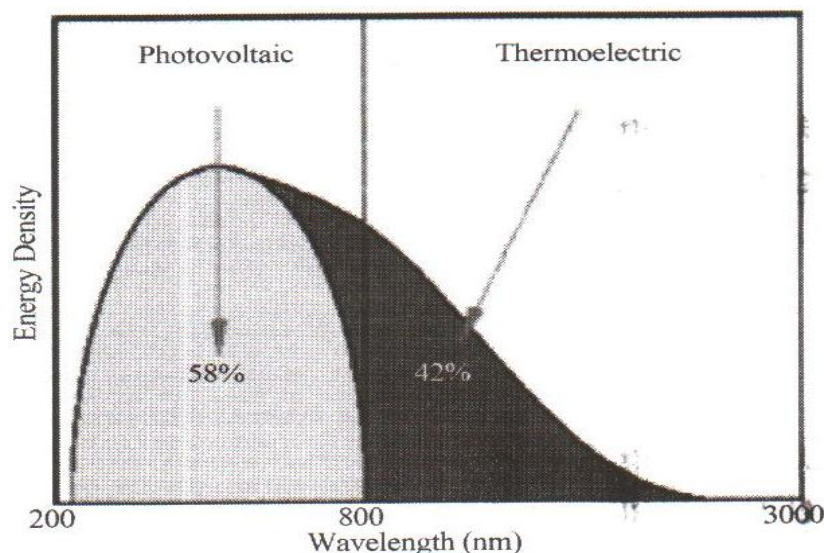


Рис. 1. Энергетическая плотность излучения Солнца в зависимости от длины волны излучения и его использования фотоэлементами и термоэлементами [1]

Недостатком фотоэлементов также является отсутствие электрогенерации в ночное время суток.

Как одно из решений проблемы более эффективного использования солнечной радиации предлагаются устройства на термоэлементах, основанные на эффекте Зеебека [2] – преобразовании перепада температур аккумуляторов тепла от Солнца. Но также и тепла нефти в трубопроводах, перепада температур между водой артезианских скважин и окружающей средой, отходящих газов теплоэлектростанций и котельных и др.

Принцип эффекта Зеебека заключается в генерации термоЭДС с коэффициентом α . Прибор, работающий на основе явления Зеебека – термопара – цепь, составленная из двух разных проводников с коэффициентами термоЭДС α_A и α_B . Если концы проводников находятся при разных температурах T_0 и T_L , причем $T_0 > T_L$, то на концах ветвей появляется разность потенциалов V_{BA} , равная термоЭДС ε :

$$V_{BA} = \varepsilon = (\alpha_A - \alpha_B)(T_0 - T_L). \quad (1)$$

Чем больше термоЭДС используемых материалов, тем более эффективна термопара, созданная на основе данных материалов.

Эффективность конверсии (превращения) термоэлектрического материала определяется безразмерным коэффициентом – термоэлектрической добротностью (или коэффициентом Йоффе):

$$ZT = \sigma \alpha^2 T / k, \quad (2)$$

где k – коэффициент теплопроводности, а $P = \sigma \alpha^2$ – термоэлектрический коэффициент мощности, σ – электропроводность. Зависимости ТЭ добротности от температуры приведены на рис. 2 [1].

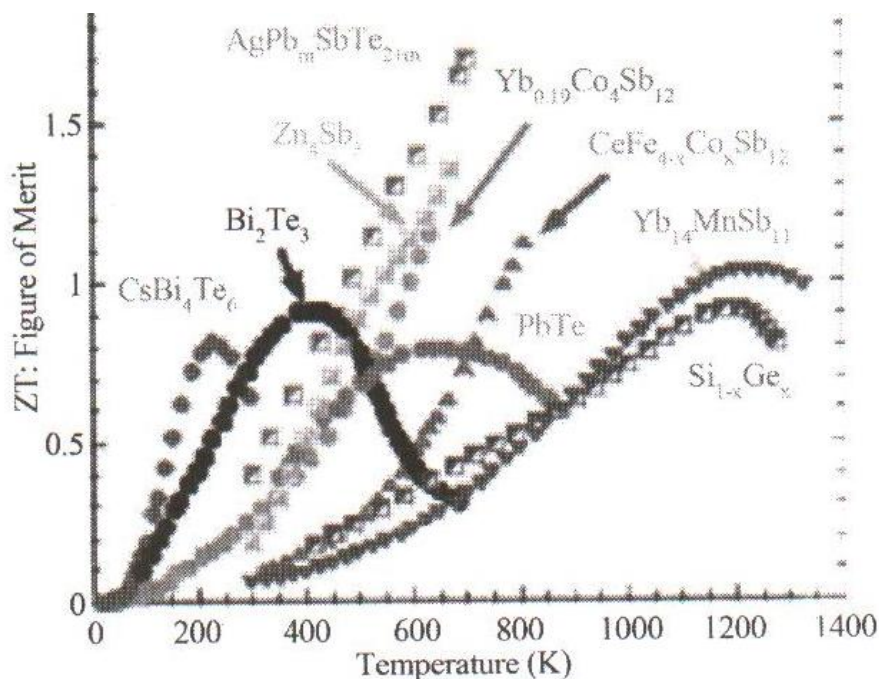


Рис. 2. Зависимости ТЭ добротности от температуры для разных термоэлектрических материалов [1]

Все три параметра σ , α и k взаимосвязаны, и поскольку рост обычно сопровождается ростом k и снижением α , термоэлектрические материалы обычно имеют $ZT \sim 1$ при интересных для нас температурах в районе 300 К, и достигают $ZT = 1.15$ при 650 °К в AgSbSe_2 допированном 4 моль % Рb, 2 моль % Вi, что соответствует эффективности цикла Карно $\sim 10\%$, в то время, как привычная на настоящее время эффективность Карно $\sim 30\%$, должна соответствовать $ZT \sim 4$.

Для достижения этого значения перспективны наноструктурированные неорганические материалы такие, как фонон-блокирующие/электрон-передающие тонкопленочные сверхрешетки [3], квантовоточечные (quantumdot) сверхрешетки [4] и наноразмерными включениями в материал [5, 6]. На таких материалах удалось добиться коэффициента $ZT > 2$. Перспективны также полимеры, которые, несмотря на низкую теплопроводность имеют широкий диапазон коэффициентов Зеебека от $10 \text{ мкВ} \cdot \text{К}^{-1}$ до $10^3 \text{ мкВ} \cdot \text{К}^{-1}$ [7].

Термопары в большом числе соединенные в термоэлектрический генераторный модуль (термоэлемент – ТЭ на рис. 3) позволяют в зависимости от типа соединения (параллельно или последовательно) термопар получать значительные величины токов и напряжений. Так, термогенераторный модуль ТГМ-199-1,4-1,5 (вторая цифра – число термопар в модуле) обеспечивает выходное напряжение порядка 0,4 В и выходную мощность порядка 45 мВт при наличии минимальной разности температур 10 °С. Необходимое для устойчивой работы современных микросхем напряжение 30 мВ обеспечивается уже при разности температур в 2–3 °С.



Рис. 3. Термоэлектрический генераторный модуль в разрезе

Существует три способа использования термоэлементов:

- генератор термоЭДС (т.е. преобразователь тепловой энергии в электрическую), на рис. 2 термопара применена в этом качестве;
- холодильник (охлаждение определенных объемов);
- тепловой насос (перекачка теплоты от холодных тел к горячим).

Термоэлектрический метод получения электроэнергии является экологически чистым, недорогим и надежным. К настоящему времени созданы материалы, термоэлектродгенераторы (ТЭГ) из которых имеют КПД = 18 %. Но ТЭГ на основе метода еще не получили распространение.

Простейшим ТЭГ является проточный ТЭГ, работающий на перепаде температур проточной жидкости (воды или нефти) и окружающего пространства. Так, температура воды из артезианской

скважины близка к 4–5 °С, а температура нефти из скважины достигает 50–55 °С. Таким образом, перепад температур ΔT может составлять для воды $\Delta T = 20\text{--}30$ °С, а для нефти зимой $\Delta T = 60\text{--}80$ °С. На ТЭГ, разработанном нами на этом принципе на 12 ТЭ нами достигнуты значения разности потенциалов $V_{BA} = 10\text{--}14$ В. Эксперименты, поставленные нами с термоэлементами ТЕС-127-06С (на 127 термопарах) показали, что на одном ТЭ можно достичь 30 мВ/град.

Другой оригинальный способ получения термоэлектрогенерации – использование нагрева теплоаккумулирующего рабочего вещества в тепловом/солнечном коллекторе днем и роста перепада температур за счет экзотермического эффекта при остывании рабочего вещества ночью.

Термоэлектрические (ТЭ)-зависимости для теплоаккумулирующих материалов (ТАМ) – кристаллогидратов $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ и $\text{CH}_3\text{COONa} \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ приведены на рис. 4.

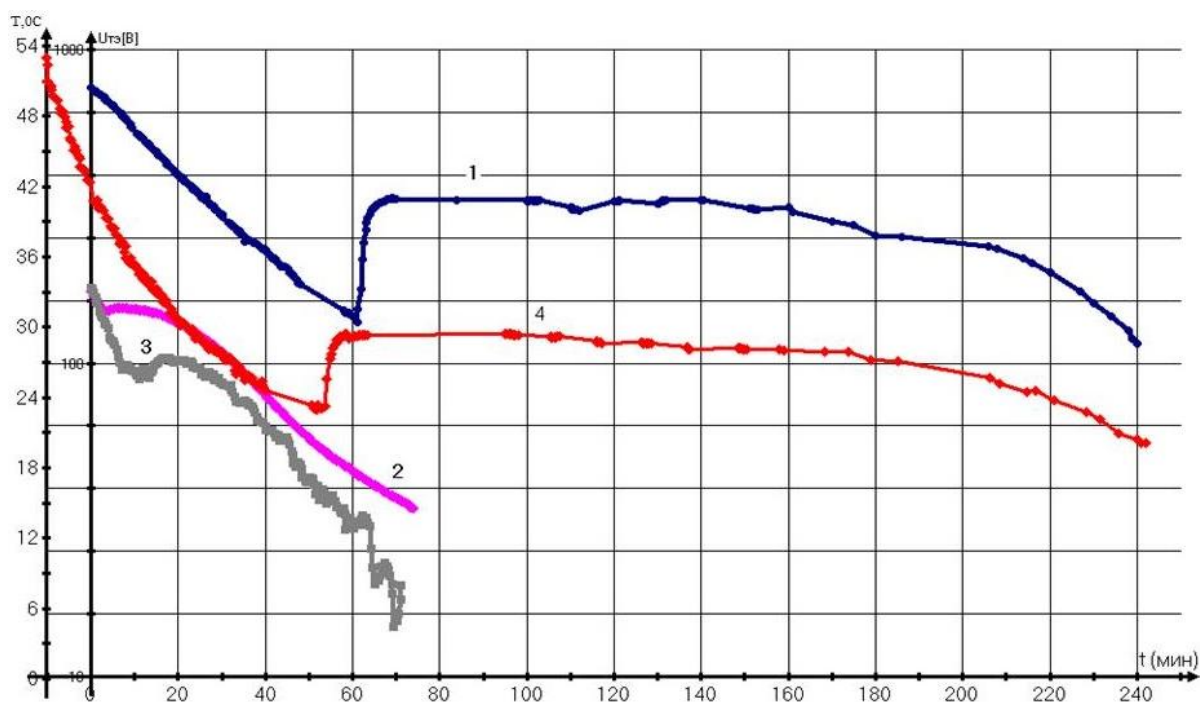


Рис. 4. Кривые 1,2,3 – термоЭДС $U(t)$ для $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, $\text{CH}_3\text{COONa} \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ и зависимости температуры от времени $T(t)$ для $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$

Как это видно из рис. 4, из максимума экзотермического пика термоЭДС $U(t)$ наиболее эффективным рабочим веществом ТАМ по максимуму $U(t)$ и длительности экзотермических пиков является $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, экзотермический фазовый переход (ФП) которого

на термоэлементе ТЕС-127-06С ведет к скачку термоЭДС $\Delta U \approx 0,3-0,4$ В, причем выделение тепла растянуто на 3 часа. Это дает основание для использования данного ТАМ и ТЕС-127-06С для выработки электроэнергии даже при малом (30–40 °С) перепаде температур. ТЭ-модули могут объединяться в параллельно или последовательно соединенные батареи из N термоэлементов. Тогда имеем кратное N увеличение тока или напряжения.

Нами разработаны ТЭГ прямой генерации электрической энергии от перепада температур окружающей среды на основе фазовых переходов и эффекта Зеебека, описанные в работах [8–10] и защищенные патентами РФ № 134698,135450[11-12]. В них используется батарея термоэлементов, горячим спаем контактирующая с тепловым/солнечным коллектором из параболической емкости с рабочим веществом РВ1. В ТЭГ тепло окружающей среды и солнца аккумулируется днем в РВ1 и используется ночью при остывании и от скачка температур при экзотермическом эффекте.

Стенки теплового/солнечного коллектора концентрируют солнечные лучи на РВ1. Теплопроводящие пластины располагаются в другом рабочем веществе РВ II при низкой температуре, в проточной воде или грунте. Используются батареи ТЭ, контроллер типа *Atmega*, в необходимое время суток переключающий направление тока с ТЭ. Подбор рабочих веществ с разными температурами фазовых переходов позволяет круглосуточно получать максимальную разность напряжений на одном ТЭ и кратную N на батарее из N термоэлементов. Положительным эффектом является увеличение времени функционирования термоэлектрогенератора, обеспечение электропитания и в ночное время, экологичность и надежность.

Структурная схема устройства управления зарядкой аккумуляторов представлено на рис. 5.

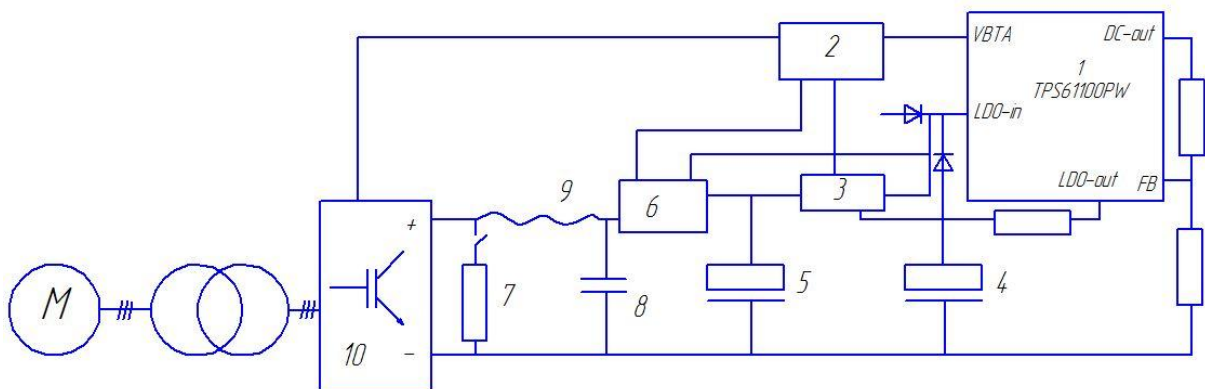


Рис. 5. Структурная схема устройства управления зарядкой аккумуляторов

Приспособление работает следующим образом. Напряжение с ВИЭ поступает на клемму LDO-in и VBAT импульсный регулятор постоянного тока 1 после сравнения поступающего напряжения с напряжением зарядки аккумулятора в компараторе 3, по программе с контроллера 2 задает в режиме широтно-импульсной модуляции напряжение и ток с выхода LDO-out на зарядку основного аккумулятора 4, который желателен быть щелочным (ввиду малой утечки). Контроллер запрограммирован на значения тока зарядки, оптимальный для аккумулятора с точки зрения его сохранности и долговременной работоспособности в зависимости от условий работы. Предусмотрен резервный аккумулятор 5, способный взять на себя также функции основного. С аккумулятора 5 после повышающего DC-DC-преобразователя 6 напряжение поступает в звено постоянного тока 7 с накопителями энергии в виде емкости C и индуктивности L , а затем в автономный или ведомый сетью инвертор 10, преобразующий постоянное напряжение в переменное напряжение регулируемой частоты, определяемой контроллером. В качестве импульсного регулятора постоянного тока 1 может быть использован ряд специализированных микросхем – *U2402B*, *TPS61100PW*, причем последняя имеет отдельный DC-out выход на + 5 В.

Схема подключения устройства зарядки к термоэлектрическому генератору представлена на рис. 6.

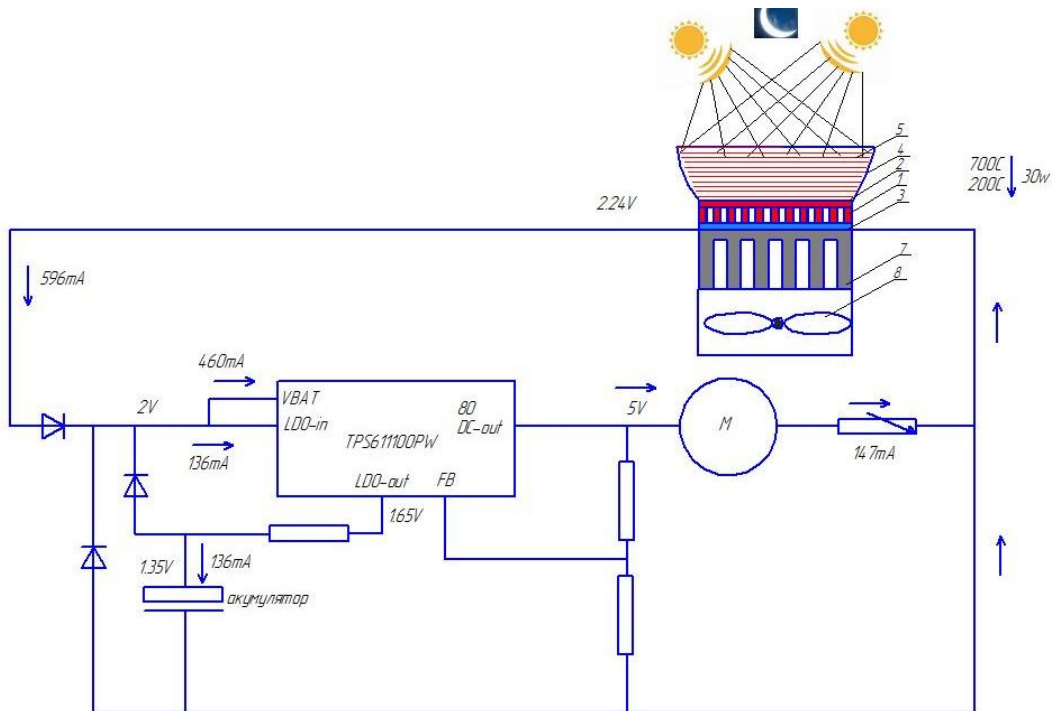


Рис. 6. Схема подключения устройства зарядки к термоэлектрическому генератору

В простейшем варианте регулирование напряжения осуществляется широтно-импульсным преобразователем (ШИП) в контуре постоянного тока. В зависимости от величины напряжения на аккумуляторе контроллер на базе *IGBT*-транзисторов подает импульсы разной продолжительности, поддерживая уровень напряжения зарядки, меняя скважность импульсов.

Положительным эффектом в устройстве является мягкий и оптимальный режим зарядки аккумулятора в условиях круглосуточной работы ВИЭ с нерегулярными и часто непредсказуемыми скачками напряжения и тока, что обеспечивает рост времени работоспособности аккумуляторов.

Список литературы

1. Jarman J.T., Khalil E.E., Khalaf E. *OpenJournalofEnergyEfficiency (OJEE)*. – 2013. – № 2. – P. 143–153.
2. Самойлович А.Г. Термоэлектрические и термомагнитные методы превращения энергии. – М.: ЛКИ, 2007. – 224 с.
3. Chowdhury I., Prasher R., Lofgreen K. et.al. *Nat. Nanotechnol.* – 2009. – № 4. – P. 235.
4. Heremans J.P., Thrush C.M., Morelli D.T. *Phys.Rev B: Condensed Matter Mater. Phys.* – 2004. – 70. – 115334.
5. Makondo J.P., Misra D.K., Zhou X.Y. et.al. *J.Am.Chem. Soc.* – 2011. – 133. – 18843.
6. Simonson J.W., Wu D., Xie W.J. et.al. *Phys.Rev B: Condensed Matter Mater. Phys.* – 2011. – 83. – 235211.
7. Kaiser A.B., *Rep. Progr. Phys.*, 2001, 64,1; Y. Xuan, X. Liu, S. Desbief et.al. *Phys.Rev B: Condensed Matter Mater. Phys.* – 2010. – 82. – 115454.
8. Кашаев Р.С., Масиаб А.Г.Н. Фазовые переходы – источник электроэнергии // Энергетика Татарстана. – 2013. – № 4. – С. 347–354.
9. Кашаев Р.С., Масиаб А.Г.Н. Круглосуточный автономный источник электроэнергии, использующий температуру окружающей среды // Фундаментальные исследования. – 2013. – № 10 (ч. 8). – С. 1724–1729.
10. Kashaev R.S.-H., Masiab A.G.N. Phase transitions in some phase changing organic materials studied by nuclear magnetic resonance relaxometry // *Chemical and Materials Engineering*. 2013, V. 1(3), PP.78–84.
11. Кашаев Р.С., Масиаб А.Г.Н. Патент РФ № 135450 РФ, МПКН *H01J45/00*, *F24J2/42*. Термоэлектрический генератор / заяв. Ипатентообладатель КГЭУ-№ 2013133273 Заяв. 16.07.2013; опуб. 10.12.13, Бюл. № 34.

12. Кашаев Р.С., Масиаб А.Г.Н. Патент РФ № 134698 РФ, МПКН01J45/00, F24J2/42. Термоэлектрический автономный источник питания/; заявитель и патентообладатель КГЭУ-№ 2013133275; заявл. 16.07.2013; опубл. 20.11.13, Бюл. № 32.

THERMOELECTRIC GENERATOR

R.S. KASHAEV, A.G.N. MASIAB, A. KCHUSNIAROV
FSBEI NPE «Kazan power-engineering university», Kazan

Annotation. As one of resolving problem of power engineering using heat of industrial liquids flows for the energy supply of autonomous automatic designs during day and night proposed design on the thermoelements, based on Seebeck effect – transformation of temperature drops at phase transitions from heats of sunlight, water and air.

Key words: power engineering, Seebeck effect, flow of liquid, phase transition

УДК 621.10+536.5

ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЕ КОТЕЛЬНОЙ ТОПЛИВНОЙ ЭМУЛЬСИЕЙ

О.В. КОЗЕЛКОВ, Р.С. КАШАЕВ, А.Р. НУРГАЛИЕВА
ФГБОУ ВПО «Казанский государственный энергетический университет»,
г. Казань

Аннотация: В работе описана структура энергоснабжения котельных топливной водо-мазутной эмульсией. Предлагается автоматическая система поддержания концентрации воды в эмульсии.

Ключевые слова: энергоснабжение котельных, топливная эмульсия, автоматическая система, концентрация воды.

Мировая энергетика все в большей степени делает ставку на топливные эмульсии как альтернативу тяжелым нефтяным остаткам в качестве топлива для тепловых электростанций (ТЭС). При высоких температурах разложение мазута идет с образованием тяжелых высокомолекулярных углеводородных соединений, которые, как и углерод сжигаются плохо, поэтому горючая часть мазутного факела представляет собой смесь углеводородов, тяжелых жидких углеводородов и твердых частиц (сажи).

Использование, водо-мазутных (битумных) эмульсий (ВМЭ) дает преимущества связанные с диспергированием топлива за счет взрыва капель в пламени факела. А именно – быстрое и практически полное сгорание эмульсии и конверсия углерода, возможность сжигания при малых концентрациях кислорода; низкая температура сжигания и снижение на порядок выбросов в атмосферу полиароматических канцерогенных соединений и на 65–80 % выбросов окислов азота NO_x ; концентрация золы после сжигания эмульсии в 100 раз меньше, чем от угля, при этом зола может быть использована в качестве руды таких стратегически важных металлов, как V и Ni, концентрация которых в ней составляет 260 мг/кг и 55 мг/кг. Использование водо-мазутных эмульсий на ТЭС и котельных позволяет экономить мазут, при этом оборудование котлов ТЭС и котельных требует минимальной адаптации, затраты на которое окупаются в течение нескольких месяцев.

Применение обводненных жидких топлив в виде эмульсий является экономически целесообразным. Появляется возможность использовать большое количество бросовых, сильно обводненных нефтяных остатков,

слив и хранение которых в открытых ямах связано с загрязнением водоемов и опасностью возникновения пожаров. Переработка отходов в топливные эмульсии дает возможность обезвреживания промышленных водных стоков, содержащих нефтяные остатки и другие органические примеси. Добавление воды к котельному топливу и поддержание его в определенном соотношении позволяет экономичнее расходовать топливо и имеет важное значение с точки зрения экологии, так как в атмосферу выделяется меньшее количество продуктов сгорания [1].

Для использования водо-мазутных эмульсий (ВМЭ) необходима система поддержания концентрации воды в ВМЭ при определенном значении 20 %. Рассмотрим возможность реализации такой системы поддержания постоянства технологического параметра на примере котельной на трех котлах ДКВР – 10–13 паропроизводительностью 45 т/час закрытого типа, предназначенной для централизованного теплоснабжения систем отопления, вентиляции и горячего водоснабжения жилых, общественных и промышленных зданий, а также технологических потребителей. Область применения – районы с расчетной температурой наружного воздуха $-20; -30; -40$ °С. В качестве вида топлива принят мазут с теплотворной способностью $Q_n^p = 9170 \frac{\text{ккал}}{\text{кг}}$. Теплоносители: перегретая вода с температурой 150–70 °С (60 %) для системы отопления, вентиляции и горячего водоснабжения и насыщенный пар давлением 7 атм (40 %) для технологических потребителей. Высокотемпературная вода приготавливается в водоподогревательной установке теплопроизводительностью 14,1 Гкал/ч. Схема теплоснабжения – закрытая. Средний часовой расход тепла на горячее водоснабжение принят в размере 10 % от суммарного отпуска тепла. Конденсат от потребителя технологического пара – напорный, принят в количестве 50 % от отпускаемого количества пара на технологию, поступает непосредственно в деаэрактор.

Система поддержания концентрации ВМЭ представлен на рис. 1. В данной системе необходимо регулировать процентное соотношение воды (20 ± 2 %) в смеси поступающей в котел, и поддерживать это соотношение в постоянстве. Это можно осуществить отслеживая количество воды в смеси. Поддержание параметра осуществляется с помощью датчика технологического параметра на основе проточного экспресс-анализатора ядерного магнитного резонанса (ЯМР). Из всех известных методов ЯМР является единственным, контролирующим концентрацию воды, нефти и газа во всем диапазоне 0–100 % [2].

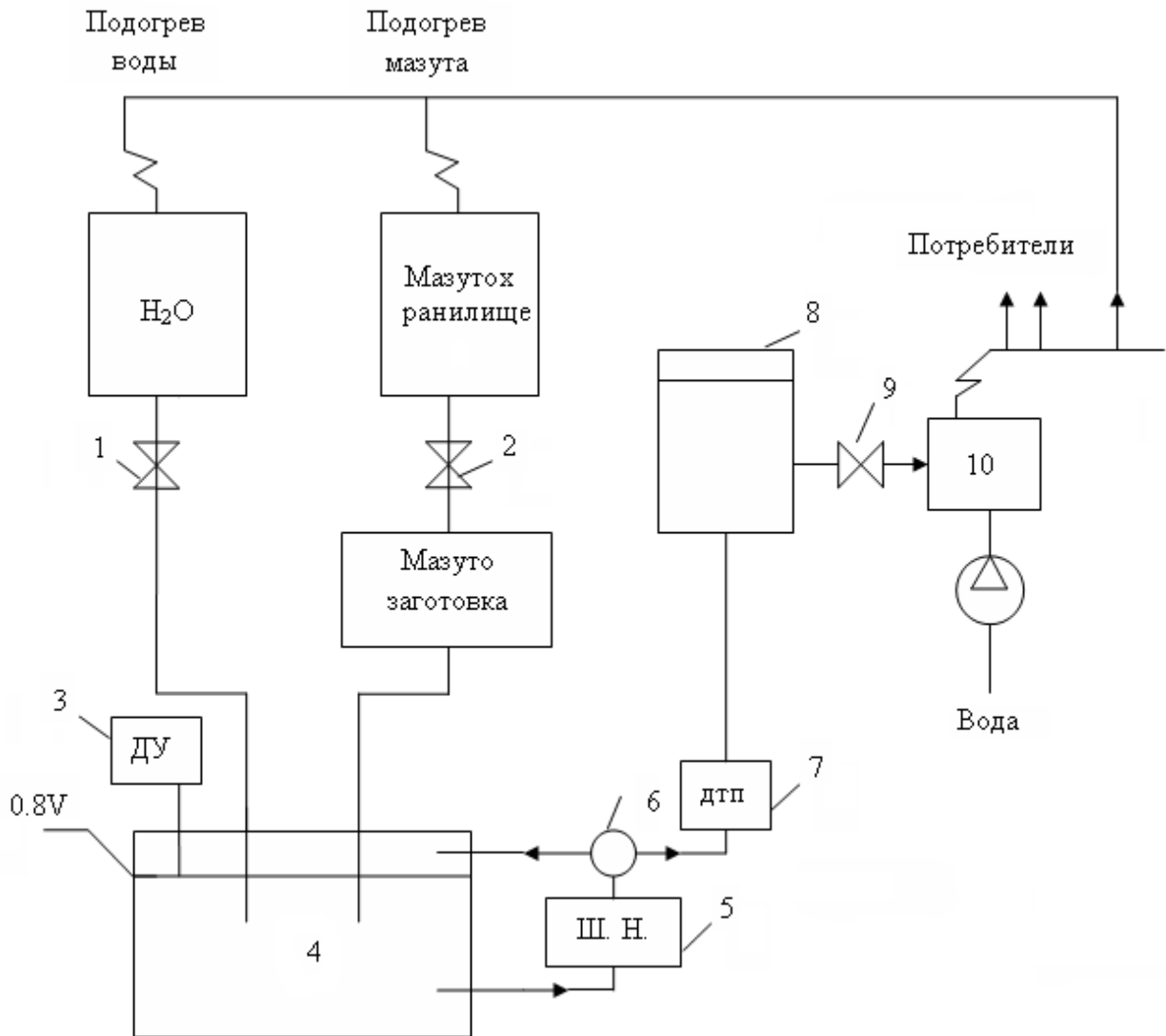


Рис. 1. Принципиальная схема системы топливоснабжения:

1, 2 и 9 – вентили, 3 – датчик уровня, 4 – емкость, 5 – насос, 6 – клапан, 7 – датчик технологического параметра, 8 – промежуточная емкость, 10 – котел

Данная система обеспечивает равномерную подачу смеси в котел и поддерживает ее в необходимой консистенции. Смесь образуется смешением котельного топлива (мазут) и воды. Количество воды в смеси должно быть $20 \pm 2\%$. Котельное топливо (к. т.) и вода (H_2O) начинают поступать при последовательном открытии вентилей 1 и 2. Эти жидкости заполняют емкость 4, за заполнением емкости ведется контроль, это осуществляет датчик уровня. При заполнении емкости до объема равного 0,8 V срабатывает датчик уровня, вентили 1 и 2 закрываются и переходят в ждущий режим. А при понижении уровня в емкости до 0,5 V датчик уровня работает на открытие вентилей 1 и 2.

После заполнения емкости включается насос. Он перемешивает топливо и воду в течение заданного времени ($t_{\text{зад}}$). По истечении этого времени открывается клапан 6, смесь начинает поступать в промежуточную емкость. В это время смесь анализируется датчиком технологического параметра. В зависимости от процентного соотношения воды в смеси открывается либо вентиль 1 либо 2. время открытого состояния вентиля зависит от количества воды в смеси. Отклонение ее на 1 % соответствует 0,5 секундному открытию вентиля. Если же смесь отвечает заданным условиям, открывается вентиль 9 и смесь подается в котел.

При разработке алгоритма функционирования системы вначале проанализируем и запишем логические операторы:

A_0 – начало алгоритма;

A_1 – сигнал на открытие вентиля 1 на заполнение емкости 4;

A_2 – сигнал на открытие вентиля 2 на заполнение емкости 4;

A_3 – контроль уровня смеси до заполнения емкости 4;

A_4 – закрытие вентиля 1 и 2 (срабатывание ДУ 3);

A_5 – включение шестеренного насоса;

A_6 – перемешивание смеси;

A_7 – открытие клапана 6 на подачу смеси в емкость 8;

A_8 – анализ смеси датчиком технологического параметра 7;

A_9 – открытие вентиля 9, подача в котел;

A_{10} – фиксирование открытого состояния вентиля 2;

A_{11} – фиксирование открытого состояния вентиля 1;

$A_{1.1}$ – сигнал открытия вентиля 2 для коррекции состояния смеси;

$A_{2.1}$ – сигнал открытия вентиля 1 для коррекции состояния смеси;

Логические условия:

$P_1 = 0$ – если объем (V) емкости 4 меньше $0.7V$ его объема, и

$P_1 = 1$ – если объем (V) емкости 4 больше $0.7V$ его объема,

$P_2 = 0$ – если время перемешивания (T) меньше заданного времени ($T_{\text{зад}}$),

$P_2 = 1$ – если время перемешивания (T) больше заданного времени ($T_{\text{зад}}$),

$P_3 = 0$ – если концентрация воды (H_2O) в смеси меньше 18 %,

$P_3 = 1$ – если концентрация воды (H_2O) в смеси 20 ± 2 %,

$P_4 = 0$ – если концентрация воды (H_2O) в смеси больше 22 %,

$P_4 = 1$ – если концентрация воды (H_2O) в смеси $20 \pm 2 \%$,

$P_5 = 0$ – если время подачи (T_1) меньше времени 0.5Δ (с),

$P_5 = 1$ – если время подачи (T_1) больше или равно времени 0.5Δ (с),

$P_6 = 0$ – если время подачи (T_2) меньше времени 0.5Δ (с),

$P_6 = 1$ – если время подачи (T_2) больше или равно времени 0.5Δ (с).

Структурная схема алгоритма представлена на рис. 2.

Таблица 1

Таблица переходов

| | A_1 | A_2 | A_3 | A_4 | A_5 | A_6 | A_7 | A_8 | A_9 | $A_{1.1}$ | $A_{2.1}$ | A_{10} | A_{11} | A_K |
|-----------|-------------|-------|-------|-------|-------|-------------|-------|-------|-----------|-------------|-----------------|-------------|-------------|-------|
| A_0 | 1 | | | | | | | | | | | | | |
| A_1 | | 1 | | | | | | | | | | | | |
| A_2 | | | 1 | | | | | | | | | | | |
| A_3 | \bar{p}_1 | | | p_1 | | | | | | | | | | |
| A_4 | | | | | 1 | | | | | | | | | |
| A_5 | | | | | | 1 | | | | | | | | |
| A_6 | | | | | | \bar{p}_2 | p_2 | | | | | | | |
| A_7 | | | | | | | | 1 | | | | | | |
| A_8 | | | | | | | | | $p_3 p_4$ | \bar{p}_3 | $p_3 \bar{p}_4$ | | | |
| A_9 | | | | | | | | | | | | | | 1 |
| $A_{1.1}$ | | | | | | | | | | | | 1 | | |
| $A_{2.1}$ | | | | | | | | | | | | | 1 | |
| A_{10} | | | p_5 | | | | | | | | | \bar{p}_5 | | |
| A_{11} | | | p_6 | | | | | | | | | | \bar{p}_6 | |

Необходимо проверить алгоритм на детерминированность. Для каждой строки должно выполняться условие:

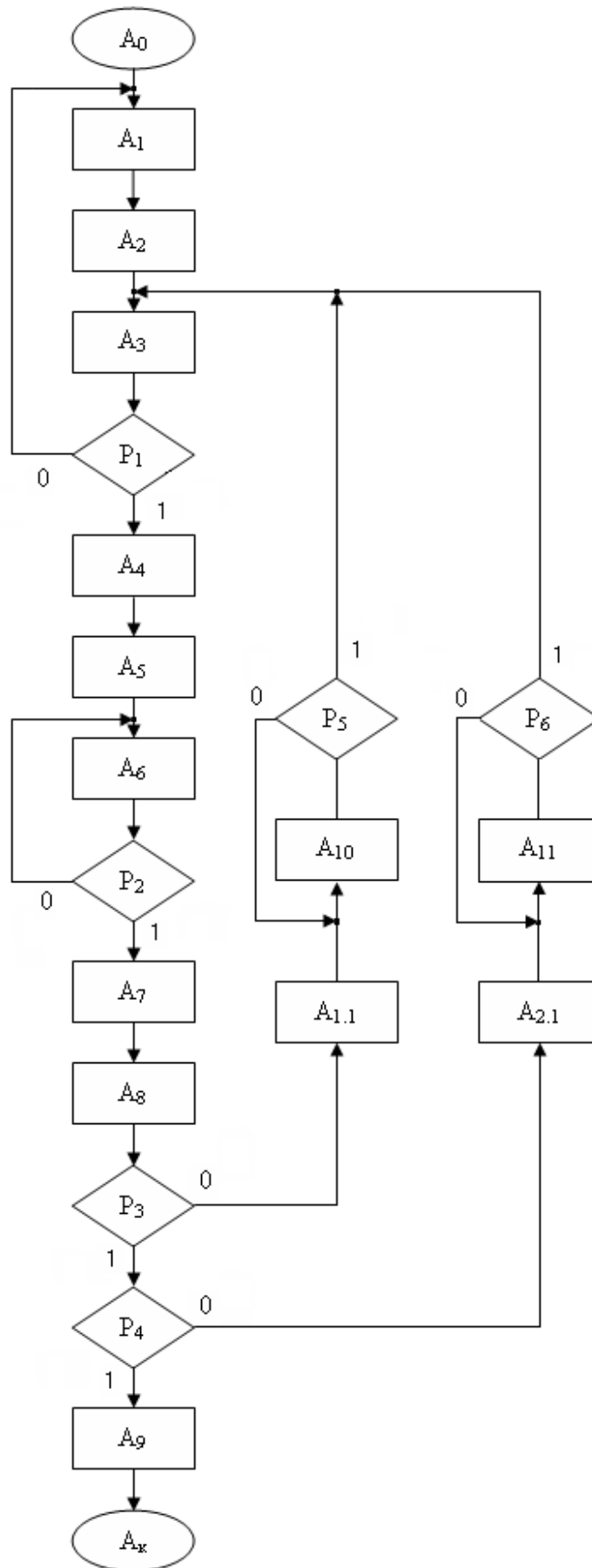


Рис. 2. Структурная схема алгоритма

$$\begin{aligned} \sum_{i=1} \alpha_{ij} &= 1; \\ \sum_{i=0} \alpha_{0j} &= 1; \\ \sum_{i=1} \alpha_{1j} &= 1; \\ \sum_{i=2} \alpha_{2j} &= 1; \\ \sum_{i=3} \alpha_{3j} &= \bar{p}_1 \vee p_1 = 1; \\ \sum_{i=4} \alpha_{4j} &= 1; \\ \sum_{i=5} \alpha_{5j} &= 1; \\ \sum_{i=6} \alpha_{6j} &= \bar{p}_2 \vee p_2 = 1; \\ \sum_{i=7} \alpha_{7j} &= 1; \\ \sum_{i=8} \alpha_{8j} &= p_3 p_4 \vee \bar{p}_3 \vee p_3 \bar{p}_4 = 1; \\ \sum_{i=9} \alpha_{9j} &= 1; \\ \sum_{i=10} \alpha_{10j} &= p_5 \vee \bar{p}_5 = 1; \\ \sum_{i=11} \alpha_{11j} &= 1; \\ \sum_{i=1.1} \alpha_{1.1j} &= 1; \\ \sum_{i=2.1} \alpha_{2.1j} &= 1 \end{aligned}$$

Структурная схема управления будет выглядеть в виде, представленном на рис. 3.

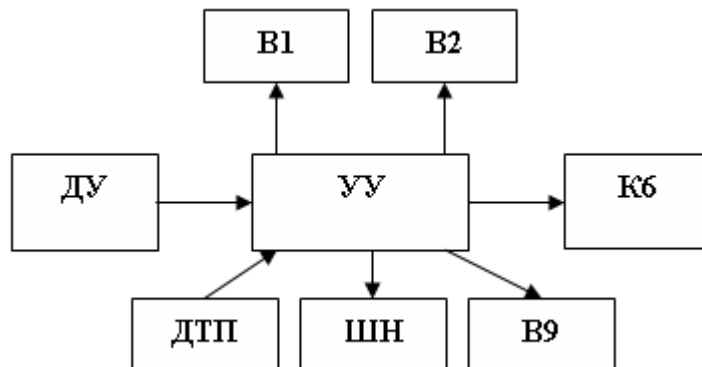


Рис. 3. Структурная схема управления

Основными элементами в данной структурной схеме являются управляющее устройство (УУ), которое получает сигналы с датчиков и посылает соответствующие сигналы на исполнительные органы, ДУ – датчик уровня, ДТП – датчик технологического параметра, ШН – шестеренный насос, В1, В2, В9 – вентили, К6 – клапан.

В схемах управления электроприводами используются бесконтактные переключающие устройства, получившие название логических элементов. Они используются взамен электромагнитных контактных реле управления. На основе логических элементов формируются бесконтактные схемы, выполняющие логические функции управления, защиты и блокировок. Достоинством таких схем является высокая надежность, малые габариты, низкое энергопотребление.

Список литературы

1. Кашаев Р.С., Малацион С.Ф., Самигуллин Ф.М., Матухин В.Л. Температурная зависимость структурно-динамических параметров и методика экспресс-анализа топливных водо-битумных эмульсий на основе метода ЯМР // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2003 – № 11–12.

2. Кашаев Р.С. Автоматизированный электропривод и средства контроля в технологических и измерительных комплексах нефтяной промышленности. – Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2010. – 363 с.

ENERGY SUPPLY OF BOILER-ROOM BY FUEL EMULSION

O.V. KOZELKOV, R.S. KASHAEV, A.R. NURGALIEVA
FSBEI NPE «Kazan power-engineering university», Kazan

Annotation: In the work described structure of supply of boiler rooms by fuel emulsion. Proposed automatic system of keeping up of water concentration in emulsion.

Key words: supply of boiler rooms, fuel emulsion, automatic system, keeping of water concentration.

УДК 66.048.37

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССОВ И ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИЕ МОДЕРНИЗАЦИИ ПРОМЫШЛЕННЫХ АППАРАТОВ РАЗДЕЛЕНИЯ СМЕСЕЙ

А.Г. ЛАПТЕВ, М.И. ФАРАХОВ, М.М. БАШАРОВ
ФГБОУ ВПО «Казанский государственный энергетический университет»,
г. Казань
ООО Инженерно Внедренческий Центр «Инжехим»

Рассмотрены проблемы и методы решения задач модернизации аппаратов на предприятиях нефтегазохимического комплекса. Основное внимание сосредоточено на масштабных эффектах и замене устаревших контактных устройств в аппаратах на более эффективные. Даны примеры, внедренные в промышленности, энергосберегающей модернизации аппаратов и установок разделения и очистки смесей на различных предприятиях РФ.

Ключевые слова: энергосбережение, массообменные колонны, контактные насадки, масштабные эффекты, отстойники, распределители фаз.

Предприятия нефтегазохимического комплекса являются важнейшими отраслями Российской промышленности. Ожидаемый промышленный рост связан с увеличением выпускаемой продукции. Следствием этого роста станет повышение нагрузки на уже имеющееся оборудование, которое зачастую является физически и морально устаревшим. Поэтому одна из важных и актуальных задач – энергоресурсосберегающая модернизация оборудования и оптимизация технологических схем [1–6].

Эффективным инструментом для решения отмеченных задач является энерготехнологический аудит, выполненный совместно с обновлением и модернизацией действующих промышленных установок. Показанные в данной работе примеры модернизации оборудования на различных предприятиях, внедренные с большим экономическим эффектом, показывают, что действующие установки и аппараты зачастую имеют большие резервы по снижению энергозатрат на единицу продукции.

Основными процессами разделения жидких, газовых и паровых смесей являются ректификация, абсорбция и экстракция. Причем,

по энергозатратам процесс ректификации значительно превосходит все остальные процессы. Так, например: на ректификацию расходуется до 30 % всех энергозатрат НПЗ, а в США на ректификацию расходуется более 3 % всей произведенной энергии.

Наши расчеты показывают, что в среднем потребление греющего пара на одну атмосферную колонну диаметром 1,4 метра ~ 1.5 т/ч, что составляет сумму затрат на пар более 110 тыс. евро в год [3]. При увеличении диаметра колонны в два раза потребление энергии повышается примерно в четыре раза. В настоящее время на предприятиях химической, нефтехимической и газовой отраслей промышленности встречаются колонны диаметром более 8–10 метров. Отсюда следует вывод, что снижение энергозатрат только на 10 % даст экономический эффект несколько сотен тысяч евро в год только на одной установке разделения.

Основными источниками энергосбережения при ректификации являются: снижение флегмового числа за счет повышения КПД колонны, использования тепла паров верха колонны, использование комплексов со связанными тепловыми потоками (минимизация энергозатрат), совмещенные (с абсорбцией, экстракцией и химической реакцией) процессы, рекуперация тепла и холода, снижение гидравлического сопротивления колонн, изменение последовательности разделения, АСУТП.

Рассмотрим основные пути снижения энергозатрат процессов разделения смесей при проведении процессов ректификации [3–6]:

1. *Минимальная реконструкция КУ* (контактных устройств) в ряде случаев может снизить энергозатраты на 5–10 %. В качестве минимальной реконструкции массообменных тарелок можно отметить следующие изменения и дополнения в конструкциях: секционирование потоков; изменение формы и высоты перегородок; установка отбойников; организация второй зоны контакта фаз; оптимизация свободного сечения КУ.

Эти мероприятия снижают гидродинамические неравномерности на контактных устройствах и, как следствие, повышается эффективность разделения, что дает возможность понизить флегмовое число и затраты на греющий пар в кипятильнике колонны.

Минимальная реконструкция характеризуется малыми затратами средств и может быть выполнена во время планового капитального ремонта установки.

Можно привести пример минимальной модернизации клапанных тарелок на колонне ГФУ (газофракционирующей установки) Тобольского нефтехимкомбината, выполненная авторами еще в 1991 году, которая без капитальных затрат позволила повысить производительность на 18–20 %

[3]. Модернизация заключалась в том, что последние ряды клапанов у сливных перегородок смонтированы в перевернутом состоянии. Это обеспечило дополнительный переток жидкости с тарелки на тарелку и вторую зону контакта фаз. За счет повышения эффективности разделения энергозатраты на единицу продукции снижены на несколько процентов.

2. *Оптимизация режимов работы* может дать снижение энергозатрат до 10–30 %. Такими мероприятиями являются: оптимизация флегмового числа в зависимости от расхода и состава питания; оптимизация давления, при котором проводится процесс разделения.

3. *Оптимизация технологической схемы*. Особо актуальна при разделении многокомпонентных смесей, когда применяют несколько связанных колонн. Снижение энергозатрат может достигнуть до 20–60 % [5]. При оптимизации обычно решаются следующие задачи: выбор тарелок питания; организация по высоте ректификационной колонны подвода и отвода тепла; ввод питания в виде пара с предыдущей колонны, т.е. организация парциального дефлегматора в ней.

4. Среди одних из эффективных, но дорогостоящих мероприятий является *замена КУ на новые* (последующая экономия энергоресурсов до 30–50 %): нерегулярные насадки; регулярные (упорядоченные) насадки; вихревые КУ; КУ с нестационарным взаимодействием фаз и др.

Следует отметить, что в последние годы устаревшие барботажные тарелки часто меняются на новые высокоэффективные насадки. Это обеспечивает кроме снижения энергозатрат на единицу продукции повышение производительности массообменных колонн [3, 5, 7].

5. Очень перспективным является направление *совмещения различных процессов* в одном аппарате. Например: реакционно-массообменные процессы могут обеспечить снижение используемого тепла до 70–80 % за счет использования тепла химической реакции и т.д.

Повышенные энергозатраты часто связаны с проблемой снижения эффективности процессов разделения смесей в промышленных аппаратах при увеличении их размеров, что получило название «масштабного эффекта».

Изучение масштабных эффектов показало, что они могут быть обусловлены неравномерностями следующих четырех типов [8]:

1. Входными неравномерностями – неоднородностями распределения потоков газа и жидкости на входе контактного устройства.

2. Неравномерностями, вызванными внутренними закономерностями двухфазного течения.

3. Неравномерностями, вызванными дефектами монтажа.
4. Неравномерностями, обусловленными дефектами конструкции.

Роль каждого из этих факторов существенно зависит от типа аппарата. Авторы данной статьи многократно сталкивались и решали аналогичные проблемы при проектировании или модернизации аппаратов в нефтехимии. Так, например, несколько лет назад нам пришлось выполнять работы, связанные с устранением различных неравномерностей в аппаратах, спроектированных одной из фирм. Эта фирма не учла, что результаты полученные на мелкомасштабном производстве далеко не всегда можно воспроизвести на крупномасштабном. Так выяснилось, что применяемые в настоящее время способы подвода газовых (паровых) и газожидкостных потоков в колонных аппаратах без использования эффективных распределителей приводят к заметному снижению разделяющей способности не только насадочных и тарельчатых колонн, но и эффективности реакторов, отстойников и других аппаратов. Вследствие неравномерности профиля скорости в поперечном сечении колонн возникают зоны со значительными локальными максимумами скорости газовых (паровых) фаз, в которых значение уноса превышает допустимое. Это приводит не только к снижению эффективности разделения за счет снижения движущей силы, а в случае тарельчатой колонны это может привести к нарушению нормальной работы 2–3 тарелок, а для насадочной колонны, не только к потере разделяющей способности целой насадочной секции, но и к преждевременному захлебыванию колонны [9].

Аналогичная ситуация и со штуцерами для отвода газовой (паровой) фазы.

Как правило, возникающие неравномерности невозможно установить на физической модели небольшого диаметра, поэтому эти недостатки обнаруживаются и устраняются путем промышленного испытания или гидродинамического моделирования контактных устройств на стендах промышленного размера.

Эффективным инструментом для решения данных задач является математическое моделирование процессов с использованием численных методов.

Исследования структуры потоков, проведенные с помощью собственных программ авторов с идентификацией использованных математических моделей на экспериментальных стендах промышленного масштаба, позволили определить ряд путей для выравнивания профиля скорости в аппаратах разделения [10].

Численно исследовано влияние проницаемых перегородок на профиль скорости в аппарате при ламинарном режиме. Выполнены расчеты 25 различных вариантов перегородок с различными значениями коэффициента гидравлического сопротивления ξ (рисунок 1). Установлено, что наиболее рациональным является интервал $4.9 < \xi < 5.9$ [10, 11].

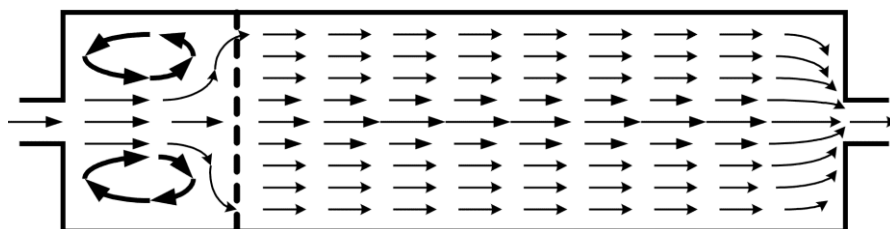


Рис. 1. Структура потока в аппарате, снабженном проницаемой поперечной перегородкой с коэффициентом сопротивления: $4,9 < \xi < 5,9$

Выполненные расчеты и анализ полученных результатов в отстойниках позволили разработать ряд конструктивных решений, позволяющих выравнивать профиль скорости движения сплошной фазы, исключить формирование застойных зон и вихревых образований различных масштабов с минимальной потерей напора в гидравлическом контуре отстойника (рис. 2). Оснащение отстойников эффективными распределителями, коалесцирующими фильтрами и тонкослойными блоками оригинальной конструкции «Инжехим» позволяет повысить эффективность их работы на порядок, что было многократно подтверждено нашей практикой модернизации промышленных отстойников ряда промышленных предприятий [10–12] (Казаньоргсинтез, Нижнекамскнефтехим, Сургутский завод стабилизации конденсата, Московский НПЗ и др.).

Не менее важно управление структурой потока газовой фазы в газосепараторах и туманоуловителях различного вида: шевронных, насадочных и сетчатых. Все они, а в особенности шевронные и сетчатые, весьма чувствительны к равномерности распределения газового потока по сечению аппарата. При боковом вводе газа в аппарат у противоположной стенки возникает зона «уплотнения» газового потока, что приводит к соответствующему росту локального значения скорости в сепарационной зоне. В этом случае максимальная производительность туманоуловителя будет ограничиваться именно этим значением скорости. Разработаны оригинальные распределители газового потока, являющиеся одновременно и первичными сепараторами капельной жидкости. Их применение

позволяет существенно (до 100 %) повысить производительность существующих туманоуловителей за счет выравнивания профиля скорости газа на входе в сепарационную часть демистера и снижения содержания капельной жидкой фазы в потоке газа [10, 13], что уменьшает гидравлическое сопротивление аппаратов и энергозатраты.

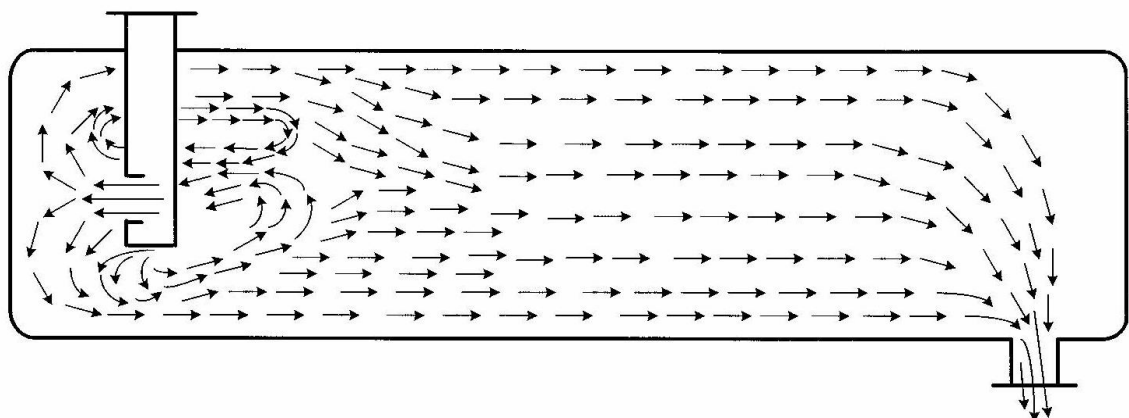


Рис. 2. Ввод среды через длинный патрубок в направлении, противоположном основному направлению движения среды в аппарате [11]

Одним из приоритетных направлений по повышению эффективности процессов и энергосберегающей модернизации массообменных аппаратов, является разработка и внедрение новых регулярных и нерегулярных контактных насадок.

Наиболее широкое применение получили следующие массообменные нерегулярные и регулярные контактные устройства: насадка «Инжехим-2000» [5] (рис. 3), керамические и стальные кольца Рашига, стальные кольца Палля, кольца ZulzerC-RingNo.2.5 [15], регулярная насадка Mellapak фирмы «Zulzer Chemtech» 125Y [15], регулярная рулонная насадка «Инжехим» [5, 14]; спиральная насадка с косым гофром, насадка «зигзаг» и плоскопараллельная насадка [16].

Нерегулярная насадка «Инжехим-2000» является современной альтернативой кольцам Палля, Рашига и другим аналогичным насадкам. При равной высоте слоя она обеспечивает большую производительность, меньшее удельное гидравлическое сопротивление и более высокое качество разделения смесей.

У регулярной рулонной гофрированной насадки «Инжехим» (рис. 3) гофры смежных листов расположены перекрестно по отношению друг к другу и образуют каналы для потока паровой фазы с интенсивной

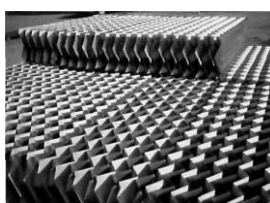
турбулентностью. Нерегулярные и регулярные насадки выполняется с элементами шероховатости, что повышает коэффициент массоотдачи в жидкой фазе. Насадки «Инжехим» технологичны в изготовлении и монтаже в колонну.



а



б



в



г

Рис. 3. Насадки: а – «Инжехим-2000»; б – «Инжехим-2002»; в – регулярная блочная; г – регулярная рулонная гофрированная насадки «Инжехим» [5, 14]

Насадки «Инжехим» внедрены в более семидесяти колонных аппаратах на различных нефтехимических предприятиях.

Список литературы

1. Саркисов П.Д. Проблемы энерго- и ресурсосбережения в химической технологии, нефтехимии и биотехнологии // Химическая промышленность. – 2008. – № 11. – С. 14–17.
2. Лаптев А.Г., Фарахов М.И. Технологический аудит и модернизация промышленных установок в нефтехимии // Химическая техника. – 2011. – № 5. – С. 36–40.
3. Фарахов М.И., Лаптев А.Г. Энерго- и ресурсосбережение при проведении процессов разделения и очистки веществ: обзор // Тр. Академэнерго КНЦ РАН. – 2008. – № 1. – С. 60–72.
4. Тимофеев В.С., Фролова А.К., Бенюнес Хассиба. Разработка принципов создания энергосберегающих технологий разделения многокомпонентных промышленных смесей // Сб. науч. трудов Рос. хим.-технол. ун-та. – 2001. – № 179. – С. 125–131.

5. Лаптев А.Г., Фарахов М.И., Минеев Н.Г. Основы расчета и модернизация теплообменных установок в нефтехимии. - Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2010. – 574 с.

6. Зельвенский Я.Д. Пути энергосбережения при разделении смесей ректификацией // Химическая промышленность. – 2001. – № 35. – С. 11–13.

7. Лаптев А.Г., Фарахов М.И. Энергоэффективное оборудование разделения и очистки веществ в химической технологии // Вестник Казан. гос. технол. ун-та, Казань. – 2011. – № 9. – С. 152–158.

8. Розен А.М. Мартюшин Е.И., Олевский В.М. и др. Масштабный переход в химической технологии: разработка промышленных аппаратов методом гидродинамического моделирования. – М.: Химия, 1980. – 320 с.

9. Фарахов М.И., Лаптев А.Г., Минеев Н.Г. Энергосберегающие модернизации установок на предприятиях нефтегазохимического комплекса // Химическая техника. – 2008. – № 12. – С. 4–7.

10. Лаптев А.Г., Фарахов М.И. Гидромеханические процессы в нефтехимии и энергетике. Казань: Изд-во Казан. гос. ун-та, 2008. – 729 с.

11. Фарахов М.И., Лаптев А.Г. Численное исследование структуры потока и модернизация гравитационных отстойников // Вода: химия и экология. – 2008. – № 2. – С. 36–40.

12. Лаптев А.Г. Фарахов М.И. Разделение гетерогенных смесей в насадочных аппаратах. – Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2006. – 342 с.

13. Фарахов М.И., Асибаков Л.И., Лаптев А.Г. Сепарация капельной влаги сетчатыми демистерами // Вода: Химия и экология. – 2010. – № 6. – С. 42–44.

14. Лаптев А.Г., Фарахов М.И., Минигулов Р.М. Теплообменные характеристики рулонной гофрированной насадки // Энергосбережение и водоподготовка. – 2010. – № 5. – С. 64–68.

15. Сокол Б.А., Чернышев А.К., Баранов Д.А. Насадки массообменных колонн. – М.: Галилея-принт, 2009. – 358 с.

16. Олевский В.М. Пленочная тепло- и массообменная аппаратура (Процессы химической и нефтехимической технологии). – М.: Химия, 1988. – 240 с.

17. Лаптев А.Г., Николаев Н.А., Башаров М.М. Методы интенсификации и моделирования теплообменных процессов. – М.: «Теплотехник», 2011. – 288 с.

EFFICIENCY AND ENERGY-SAVING MODERNIZATION OF INDUSTRIAL APPARATUSES FOR MIXTURE FRACTIONATION

A.G. LAPTEV, M.I. FARAKHOV, M.M. BASHAROV
FSBEI HPE «Kazan power-engineering university», Kazan
LLC Engineering Promotional Center «Inzhekhim»

Annotation. Problems and methods of solution of problems related to energy saving at the enterprises of the oil and gas chemical complex are considered. Main emphasis is given to replacements of outdated contact devices installed in apparatuses with more efficient contact devices. Examples of implementation into industry of energy saving modernizations of apparatuses and of units for mixture fractionation and cleaning at different enterprises of the Russian Federation are presented.

Keywords: energy saving, mass transfer apparatuses, contact packings, scale effects, sumps, distributors phases.

УДК 697.358

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ ТЕПЛООТДАЧИ В ТУРБУЛЕНТНЫХ ПЛЕНКАХ

Е.А. ЛАПТЕВА, Г.К. ХАМИДУЛЛИНА

ФГБОУ ВПО «Казанский государственный энергетический университет»,
г. Казань

Аннотация Рассмотрены математические модели Прандтля и Левича для определения средних коэффициентов теплоотдачи в турбулентных пленках, стекающих по гладким вертикальным поверхностям теплообменных аппаратов.

Ключевые слова: Модель Прандтля, модель Левича, пленка, теплоотдача.

Теоретическое описание процессов теплообмена при турбулентном режиме течения представляет собой, по сравнению с ламинарным режимом, гораздо более сложную задачу. Это связано с незамкнутостью системы уравнений, описывающей такие течения. В настоящее время предложено много полуэмпирических моделей для описания турбулентного течения, которые хорошо согласуются с опытом. Однако эти модели в основном относятся к течениям однофазных сред в гидравлически гладких трубах.

Проведение различных процессов тепло- и массообмена в пленочных аппаратах является одним из основных в различных отраслях промышленности и энергетике. В данной работе рассмотрен теоретический подход моделирования теплоотдачи в турбулентной пленке. Основные характеристики и закономерности пленочного течения представлены в работах [1-4] и во многих других.

Рассмотрим стабилизированное турбулентное течение пленки жидкости со свободной поверхностью, стекающей в направлении силы тяжести по гладкой вертикальной поверхности. Режим взаимодействия с газовым или паровым потоком слабый ($\tau_{ст} \gg \tau_{г-ж}$, где $\tau_{ст}$ и $\tau_{г-ж}$ – касательные напряжения на стенке и межфазной поверхности пленки, Па). На стенке образуется пограничный слой, толщина которого соизмерима с толщиной пленки. Между стенкой и пленкой происходит перенос теплоты. Известно, что трубы промышленных пленочных аппаратов, как

правило, имеют диаметр 20–70 мм, и кривизна их поверхности не оказывает существенного влияния на процессы переноса в жидкой пленке.

Модель Прандтля

В вязком подслое турбулентная вязкость $\nu_T = \lambda_T / \rho c_p = 0$.

Сопротивление переносу тепла в вязком подслое

$$\frac{1}{\alpha_1} = \frac{\delta_1}{Pr^{1/3} \lambda} = \frac{R_1 Pr^{2/3}}{\rho c_p u_*}, \quad (1)$$

где δ_1 – толщина вязкого подслоя, м.; $Pr = \mu c_p / \lambda$ – число Прандтля; λ – коэффициент удельной теплопроводности, Вт/(м К); $R_1 = u_* \delta_1 / \nu_T$ – безразмерная толщина вязкого подслоя; μ, ν – коэффициенты динамической и кинематической вязкости, Па с; ρ – плотность среды (кг/м³); c_p – теплоемкость (Дж/кг К); u_* – динамическая скорость, м/с; α – коэффициент теплоотдачи Вт / (м² К);

Сопротивление переносу тепла в турбулентной области ($\lambda_T \gg \lambda$)

$$\frac{1}{\alpha_T} = \int_{\delta_1}^{\delta} \frac{dy}{\lambda_T} = \int_{\delta_1}^{\delta} \frac{dy}{\rho c_p \chi u_* y / Pr_T}. \quad (2)$$

После интегрирования (2) получено

$$\frac{1}{\alpha_1} = \frac{\ln(R_\delta / R_1) Pr_T}{\rho c_p \chi u_*}, \quad (3)$$

где $R_\delta = u_* \delta / \nu$; $R_1 = u_* \delta_1 / \nu$ – безразмерные комплексы; Pr_T – турбулентное число Прандтля.

Сопротивление переносу тепла во всей пленке

$$\frac{1}{\alpha} = \frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_T} = \frac{R_1 Pr^{2/3} + \frac{Pr_T}{\chi} \ln(R_\delta / R_1)}{\rho c_p u_*}. \quad (4)$$

Отсюда коэффициент теплоотдачи

$$\alpha = \frac{\rho c_p u_*}{R_1 Pr^{2/3} + \frac{Pr_T}{\chi} \ln(R_\delta / R_1)} \quad (5)$$

Данное выражение является достаточно общим и при соответствующем определении его параметров (u_* , R_1 , R_δ , Pr_T) позволяет вычислить коэффициент теплоотдачи при турбулентном движении среды у твердой поверхности. Например, при течении однофазного потока в трубе ($Re_d > 10^4$) $u_* = u_{cp} \sqrt{\xi/8}$; $R_1 = 11.6$; $R_\delta = R_1 \exp[\chi(u_{cp}/u_* - R_1)]$ и расчет коэффициента теплоотдачи (5) дает удовлетворенные результаты по сравнению с опытными данными и известными выражениями.

Основными параметрами в полученном выражении является динамическая скорость на стенке канала при пленочном течении u_* и безразмерные комплексы R_δ и R_1 .

Динамическая скорость стенке вертикально канала находится из уравнения баланса сил $\tau_{ст} = \rho_{ж} g \delta$, отсюда $u_* = \sqrt{g \delta}$.

Константа турбулентности $\chi = 0.4$, а турбулентное число Прандтля обычно принимается $Pr_T \approx 1$.

В данном выражении безразмерные комплексы R_1 и R_δ найдем с применением различных подходов.

1. Примем за среднюю толщину динамического пограничного слоя среднюю толщину турбулентной пленки δ (пренебрегая участком гидродинамической стабилизации). Тогда $R_\delta = u_* \delta / \nu$, где $u_* = \sqrt{g \delta}$; $\delta = 0,14 \theta Re^{0,583}$; $\theta = (v^2 / g)^{1/3}$; число Рейнольдса пленки $Re = 4q / \nu$; q – приведенная плотность орошения (к периметру течения), $m^3 / (m \cdot c)$.

Тогда

$$R_\delta = 0,052 Re^{0,875}. \quad (6)$$

2. Значение безразмерной толщины вязкого подслоя в турбулентной пленке можно вычислить по выражению, полученному путем сопряжения линейного профиля скорости в вязком подслое и степенного (1/7) в турбулентной области [2]

$$R_1 = \left(\frac{u_{гр}}{u_*} \right)^{7/6} R_\delta^{-1/6}, \quad (7)$$

$$u_{гр} = 1,15 u_{cp},$$

где $u_{cp} q / \delta$ – средняя скорость жидкости в пленке, м/с.

Отсюда запишем

$$R_1 = \left(\frac{1,15q}{\delta \sqrt{g\delta}} \right)^{7/6} R_\delta^{-1/6}. \quad (8)$$

Также на основе отношения потоков импульса в пограничном слое на гладкой пластине или трубе ($R \gg \delta$) к потоку импульса в пограничном слое с различными возмущениями (шероховатость поверхности, двухфазность и т.п.) Получено [2]

$$R_1 = 11,6 \frac{u_{гр}}{u_*} \sqrt{Cf_0 / 2}, \quad (9)$$

где Cf_0 – коэффициент трения на пластине или в трубе $Cf_0 = \lambda_0 / 4 = 0,316 / (4 Re_d^{0,25})$; $Re_d = u_{ср} 2R / \nu$ – число Рейнольдса для трубы; R – радиус трубы, м.

Модель Левича

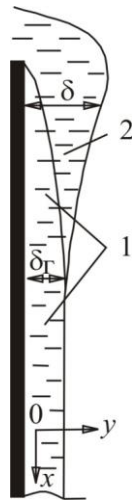


Рис. 1. Пограничный слой на начальном участке жидкой пленки:
1 – область пограничного слоя; 2 – область потенциального течения

Далее рассмотрен вывод уравнения для расчета коэффициента теплоотдачи в турбулентной пленке с применением функции турбулентного обмена Левича:

$$a_T \approx \frac{\rho u^2 (v')^3}{\sigma}, \quad (10)$$

где σ – поверхностное натяжение, Н/м; v' – пульсационная скорость, м/с.

В пограничном слое в качестве характерной скорости турбулентных пульсаций v' обычно принимают динамическую скорость ($v' \approx u_*$).

С использованием функции (10) запишем сопротивление переносу тепла в пленке

$$\frac{I}{\alpha} \approx \frac{I}{\rho c_p} \int_0^{\delta_i} \frac{dy}{a + \rho y^2 u_*^3 / \sigma} = \frac{\sigma}{\rho^2 c_p u_*^3 \delta} \int_0^1 \frac{d\varphi}{(\sqrt{k})^2 + \varphi^2} = \frac{\sigma}{\rho^2 c_p u_*^3 \delta} \frac{I}{\sqrt{k}} \operatorname{arctg} \sqrt{\frac{I}{k}},$$

где $k = a \sigma / \rho u_*^3 \delta^2$, $\varphi = y / \delta$; a – коэффициент температуропроводности, $\text{м}^2/\text{с}$.

Отсюда получим приближенное уравнение для определения коэффициента теплоотдачи

$$\alpha = \rho c_p u_* \sqrt{\frac{u_* a \rho}{\sigma}} \left(\operatorname{arctg} \left(R_\delta v \sqrt{\frac{\rho u_*}{a \sigma}} \right) \right)^{-1}. \quad (11)$$

Значение arctg здесь и далее в радианах; $R_\delta = u_* \delta / \nu$.

Найдем параметр R_δ на основе условия баланса импульса в пограничном слое. Для этого сопротивление переносу импульса представим в форме:

$$\frac{\rho U_{\text{гр}}}{\tau} = \frac{1}{\gamma} \approx \int_0^{\delta} \frac{dy}{\nu + \rho y^2 u_*^3 / \sigma}, \quad (12)$$

где используется коэффициент турбулентного обмена в виде (10) и допускается, что $\text{Pr}_t \approx 1$.

Отсюда приближенное выражение для расчета R_δ получит вид:

$$R_\delta = \sqrt{\frac{\sigma}{\nu \rho u_*}} \operatorname{tg} \left(U_{\text{гр}} \sqrt{\frac{\nu \rho}{u_* \sigma}} \right). \quad (13)$$

Число Нуссельта для пленочного течения запишется в виде:

$$\text{Nu} = \alpha \theta / \lambda, \quad (14)$$

где λ – удельная теплопроводность жидкости, $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$; $\theta = (v^2 / g)^{1/3}$ – приведенная толщина пленки, м .

Далее представлены результаты расчета коэффициентов теплоотдачи в виде безразмерных комплексов и сравнение с известными экспериментальными данными.

На рис. 2 даны результаты расчета безразмерного комплекса с использованием уравнений (5) и (11) и сравнение с экспериментальными данными по стабилизированной теплоотдаче в пленке жидкости, полученными другими исследователями.

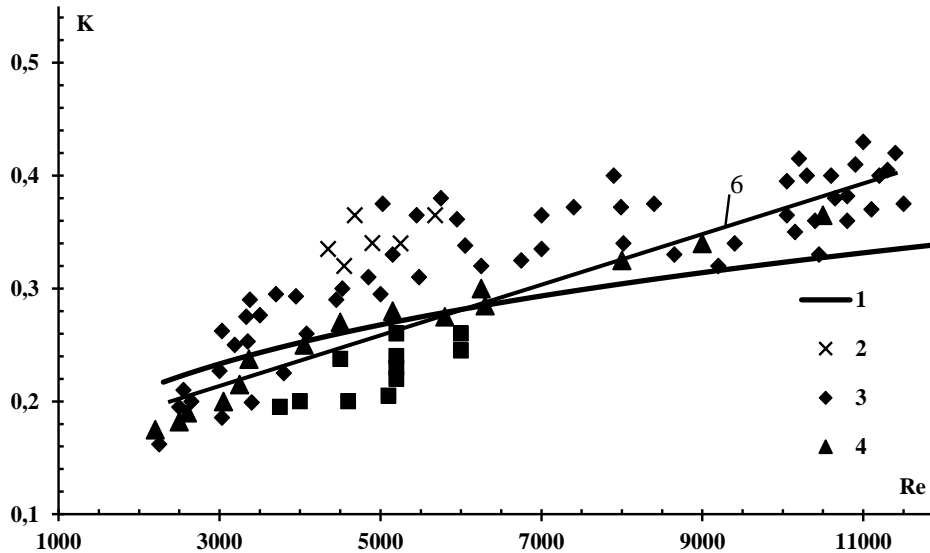


Рис. 2. Обобщенные экспериментальные данные различных исследователей по локальной стабилизированной теплоотдаче при течении пленки жидкости по вертикальной поверхности: 1,6 – расчет по уравнениям (5,11); 2 – экспериментальные данные (вода) [5]; 3 – экспериментальные данные (вода) [6]; 4 – экспериментальные данные (вода) [7]; 5 – экспериментальные данные (вода) [8]; $K = Nu Pr^{-0,5}$

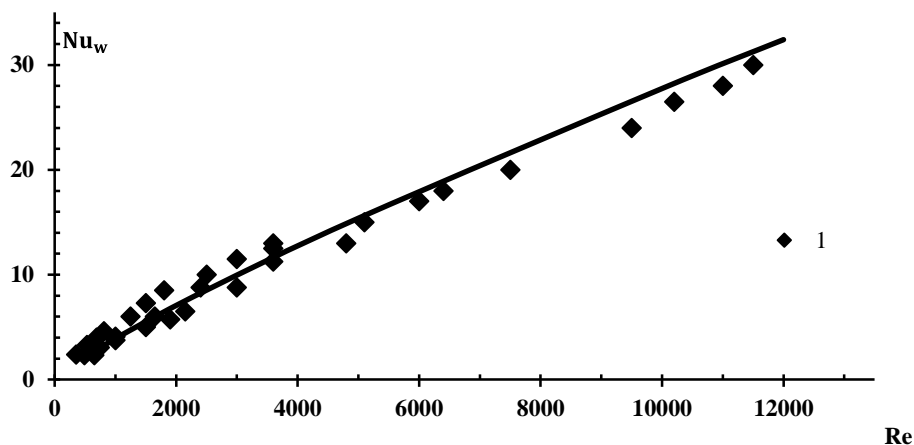


Рис. 3. Корреляция данных по теплоотдаче при пленочном течении:
1 – опытные результаты различных авторов, обобщенные в работе [3];
2 – расчет по уравнению (11)

На рис. 3 показаны расчетные по формуле (11) и опытные значения коэффициентов теплоотдачи в безразмерном виде, где $Nu_w = \frac{\alpha \cdot \delta_{пл}}{\lambda}$.

Из рис. 2 и 3 следует удовлетворительное согласование результатов расчета с экспериментальными данными различных авторов. Причем лучшее результаты дает уравнение (11).

Выводы

Показан пример использования полученных выражений для вычисления коэффициентов теплоотдачи в турбулентной пленке. Дано сопоставление результатов расчета коэффициентов теплоотдачи в виде безразмерных комплексов с известными экспериментальными данными.

Полученные результаты удовлетворительно согласуются с экспериментами и выражение (11) рекомендуется для инженерного расчета стабилизированной теплоотдачи при турбулентном течении гравитационной пленки по вертикальной поверхности. Кроме этого уравнение (11) можно использовать и для режима сильного взаимодействия фаз при соответствующем вычислении его параметров.

Список литературы

1. Войнов Н.А., Николаев Н.А. Пленочные трубчатые газожидкостные реакторы (гидродинамика, тепло и массообмен). – Казань: Издательство «Отечество», 2008. – 272 с.
2. Лаптев А.Г. Модели пограничного слоя и расчет тепломассообменных процессов. – Казань: Изд-во Казан. ун-та, 2007. – 500 с.
3. Нигматуллин Р. И. Динамика многофазных сред. Ч. II. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1987. – 360 с.
4. Холпанов Л.П. Гидродинамика и тепломассообмен с поверхностью раздела / Л.П. Холпанов, В.Я. Шкадов. – М.: Наука, 1990. – 271 с.
5. Ганчев Б.Г., Козлов В.М., Лозовецкий В.В., Никитин В.М. Исследование местных коэффициентов теплоотдачи в пленке жидкости, стекающей по вертикальной поверхности / Изв. Вузов СССР. Машиностроение. – 1970. – № 9. – С. 114–117.
6. Живайкин Л.Я., Холостых В.И., Бляхер И.Г. Теплообмен между вертикальной стенкой и стекающей пленкой жидкости при ее охлаждении // Изв. Вузов. СССР. Энергетика. – 1978. – № 4. – С. 132–135.
7. Wilke W. Wärmeübergang an Rieselfilme // VDI-Forschungsheft 490. 1962. 36 S.

8. Yoshioka K., Hasegawa S. Heat transfer to falling water film on a vertical surface // J. Nucl. Sci. and Technol. – 1975. – Vol.12. – № 10. – P. 618–625.

DETERMINATION OF HEAT TRANSFER COEFFICIENTS IN TURBULENT FILMS

E.A. LAPTEVA, G.K. KHAMIDULLINA
FSBEI HPE «Kazan power-engineering university», Kazan

Abstract mathematical models of Prandtl and Levich to determine average heat transfer coefficients in turbulent films flowing down a smooth vertical surfaces of heat exchangers.

Keywords: Prandtl Model, model Levich, film, heat transfer.

УДК 62.83

СИНТЕЗ ВЫСОКОТОЧНЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ MATLAB SIMULINK

Н.А. МАЛЁВ, О.В. ПОГОДИЦКИЙ, Т.Н. ЛЬВОВА, Е.П. ТУКАЕВА
ФГБОУ ВПО «Казанский государственный энергетический университет»,
г. Казань

Рассмотрен инженерный метод синтеза регулятора положения для астатических электроприводов, обеспечивающий высокую точность и малую колебательность переходных процессов. Показан порядок расчета желаемой передаточной функции системы с применением дифференцирующего контура первого порядка. Приведен пример синтеза и моделирования системы управления электропривода с астатизмом первого порядка.

Ключевые слова: синтез, регулятор, астатизм, точность, колебательность.

В современных механотронных системах применяются высокоточные системы управления электроприводов (СУЭП). Проблема обеспечения точности сопряжена с увеличением колебательности процесса управления, что негативно сказывается на энергосбережении. Ряд методик [1, 2] позволяет уменьшить колебательность СУЭП, приближая процесс управления к апериодическому. Так, при синтезе регулятора на основе требований к динамической точности принимают показатель колебательности $M = 1,1-1,3$. При использовании номограмм Солодовникова минимальное перерегулирование составляет 10 %. Уменьшение колебательности и перерегулирования возможно при использовании методов модального управления, когда характеристический многочлен задается в стандартной форме биномиального распределения.

Перечисленные методы не позволяют в полной мере обеспечить переходные процессы, близкие к апериодическим, при условии сохранения требуемой точности. В статье предлагается устранить этот недостаток при синтезе регулятора положения $W_{pp}(s)$ на этапе формирования желаемой передаточной функции $W_{ж}(s)$, которая рассчитывается исходя из требований к порядку астатизма, показателю колебательности M , а также установившимся ошибкам при обработке заданных угловых параметров движения исполнительного вала электропривода.

Этапы инженерного метода синтеза астатических малоколебательных систем управления электроприводов представлены в виде блок-схемы на рис. 1.

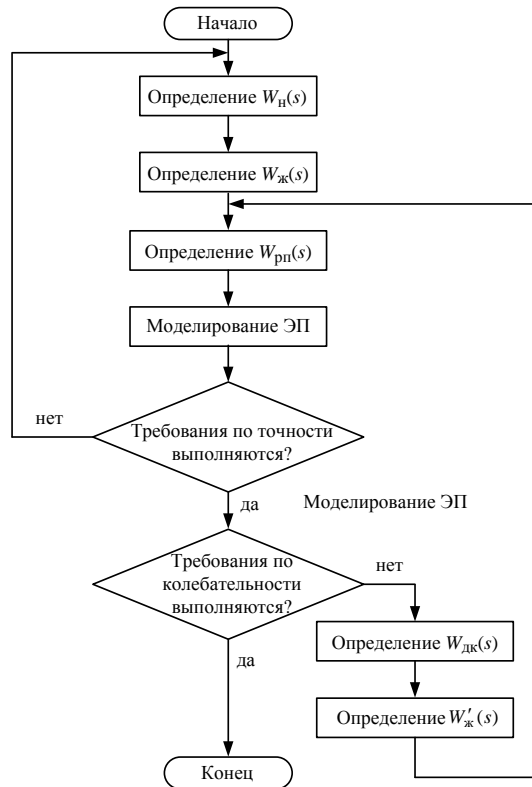


Рис. 1. Блок-схема этапов синтеза регулятора положения

Синтез регулятора положения производится на основании соотношения

$$W_{рп}(s) = \frac{W_{ж}(s)}{W_{н}(s)}. \quad (1)$$

Передаточная функция неизменяемой части $w_{н}(s)$ рассчитывается на начальном этапе проектирования электропривода.

По полученной передаточной функции $w_{рп}(s)$ строится ЛАЧХ регулятора, и путём аппроксимации полученной ЛАЧХ асимптотами определяются вид и параметры регулятора положения.

Проверка выполненного синтеза осуществляется путём моделирования системы и оценки его результатов с точки зрения удовлетворения требованиям на проектирование.

В случае неудовлетворительных результатов моделирования по передаточной функции $w_{ж}(s)$ строятся желаемые ЛЧХ и определяется частота среза $\omega_{жс}$.

Затем желаемую передаточную функцию следует домножить на выражение

$$W_{\text{дк}}(s) = \frac{T_{\text{дк}}s + 1}{\tau s + 1}, \quad (2)$$

где $W_{\text{дк}}(s)$ – передаточная функция дифференцирующего контура первого порядка, $T_{\text{дк}} = \frac{1}{\omega_{\text{жс}}}$; $\tau \ll T_{\text{дк}}$ – постоянные времени дифференцирующего контура, и определить передаточную функцию

$$W'_{\text{ж}}(s) = W_{\text{дк}}(s)W_{\text{ж}}(s).$$

Благодаря наличию в выражении (2) производной от входного воздействия обеспечивается увеличение устойчивости желаемой части подъёмом фазовой частотной характеристики в зоне частоты среза.

В статье рассматривается синтез регулятора положения электропривода с астатизмом первого порядка. Для расчётов приняты следующие параметры:

- максимальная угловая скорость нагрузки $\Omega_{\text{max}} = 0,992$ рад/с;
- максимальное угловое ускорение нагрузки $\varepsilon_{\text{max}} = 0,623$ рад/с²;
- ошибка по скорости $\Delta\alpha_{\Omega} = 15$ угл. мин;
- ошибка по ускорению $\Delta\alpha_{\varepsilon} = 15$ угл. мин;
- показатель колебательности $M = 1,1$.

Передаточная функция неизменяемой части для разомкнутой системы

$$W_{\text{н}}(s) = \frac{6,0265}{0,000014s^3 + 0,0078s^2 + s}.$$

Добротность по скорости

$$K_{\Omega} = \sqrt{2} \frac{\Omega_{\text{max}}}{\Delta\alpha_{\Omega}} = \sqrt{2} \frac{0,992}{0,052} = 26,98 \text{ с}^{-1}.$$

Базовая частота

$$\omega_0 = \sqrt{\sqrt{2} \frac{\varepsilon_{\text{max}}}{\Delta\alpha_{\varepsilon}}} = \sqrt{\sqrt{2} \frac{0,623}{0,052}} = 4,116 \text{ с}^{-1}.$$

Желаемые постоянные времени определяются по формулам

$$T_{3ж} = \frac{\sqrt{M(M-1)}}{\omega_0(M+1)} = \frac{\sqrt{1,1(1,1-1)}}{4,116(1,1+1)} = 0,038 \text{ с}; \quad T_{2ж} = \frac{1}{\omega_0} \sqrt{\frac{M}{M-1}} = \frac{1}{4,116} \sqrt{\frac{1,1}{1,1-1}} = 0,806 \text{ с}.$$

При заданном показателе колебательности $M = 1,1$ значение протяжённости участка желаемой ЛАЧХ с наклоном -40 дБ/дек $h_1 = 2,05$ и соответствующая постоянная времени

$$T_{1ж} = T_{2ж} h_1 = 0,806 \cdot 2,05 = 1,65 \text{ с}.$$

Желаемая передаточная функция для электропривода с астатизмом первого порядка

$$W_{ж}(s) = \frac{K_{\Omega}(T_{2ж}s+1)}{s(T_{1ж}s+1)(T_{3ж}s+1)} = \frac{26,98(0,806s+1)}{s(1,65s+1)(0,038s+1)} = \frac{21,746s+26,98}{0,0627s^3+1,688s^2+s}. \quad (3)$$

В результате расчетов с применением формулы (1) имеем передаточную функцию регулятора положения

$$W_{пп}(s) = \frac{0,0003044s^4 + 0,17s^3 + 21,96s^2 + 26,98s}{0,3779s^3 + 10,17s^2 + 6,027s},$$

откуда видно, что порядок числителя передаточной функции $W_{пп}(s)$ больше порядка знаменателя, что говорит о невозможности физической реализации подобной структуры. Переходим к построению ЛАЧХ регулятора положения с последующей её аппроксимацией пятью асимптотами с целью упрощения передаточной функции.

ЛАЧХ регулятора положения представлена на рис. 2.

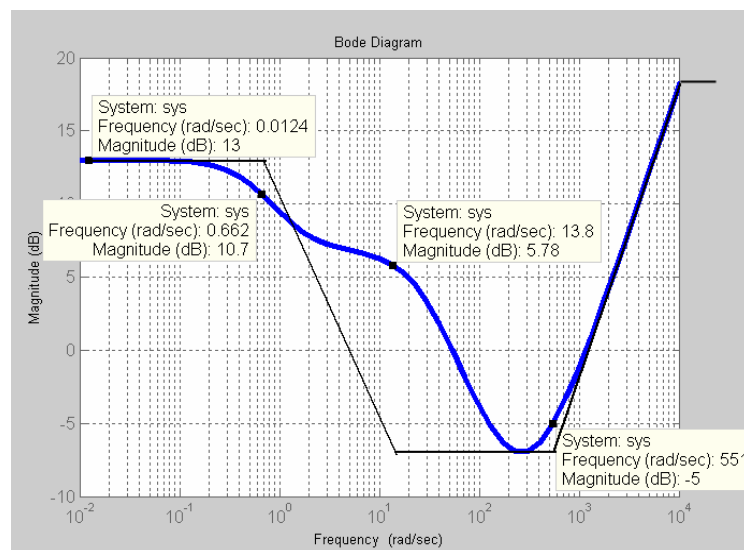


Рис. 2. ЛАЧХ регулятора положения

С учетом полученных значений передаточная функция синтезированного регулятора положения принимает вид:

$$W_{\text{рп}}(s) = \frac{k_{\text{рп}}(T_2s+1)(T_3s+1)}{(T_1s+1)(T_4s+1)} = \frac{4,467(0,072s+1)(0,0018s+1)}{(1,5s+1)(0,0001s+1)}$$

Результаты моделирования электропривода с регулятором положения представлены на рис. 3, 4.

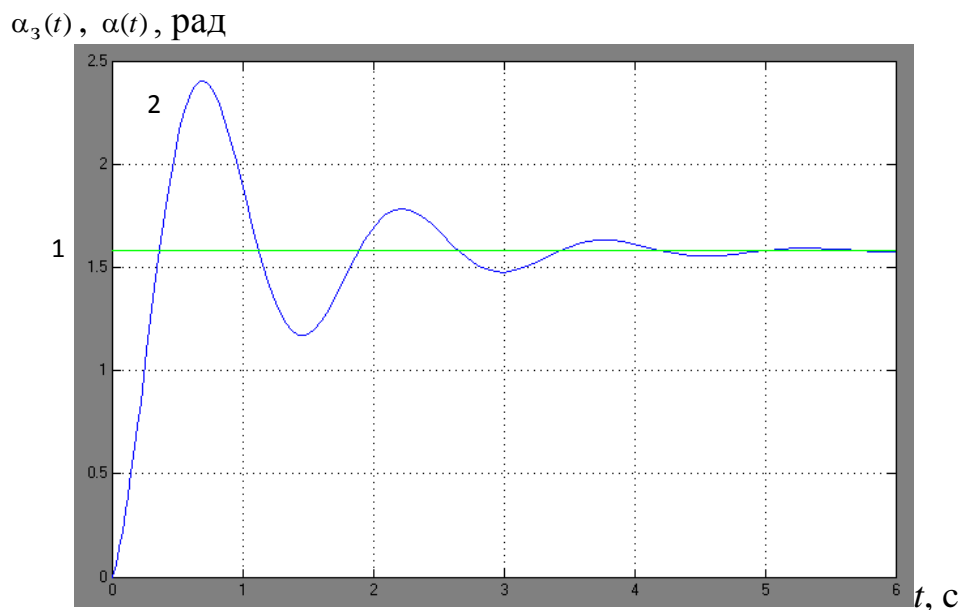


Рис. 3. Графики зависимостей: 1) $\alpha_3(t)$; 2) $\alpha(t)$ при ступенчатом задающем воздействии

Из анализа рис. 3 видно, что ступенчатое воздействие обрабатывается без ошибки за примерно за 6 с, с перерегулированием 52 %, что говорит о значительной колебательности системы.

Ошибка по скорости $\Delta\alpha_{\Omega}$ составляет менее 15 угл. мин, что соответствует требуемой точности. Для уменьшения колебательности переходного процесса в соответствии предложенной методикой рассчитываем параметры дифференцирующего контура. Строим желаемые ЛЧХ. Частота среза желаемой ЛАЧХ составляет $\omega_{\text{жс}} = 12 \text{ с}^{-1}$. Тогда постоянные времени

$$T_{\text{дк}} = \frac{1}{\omega_{\text{жс}}} = \frac{1}{12} = 0,0833 \text{ с}; \tau = 0,001 \text{ с}$$

и передаточная функция дифференцирующего контура

$$W_{\text{дк}}(s) = \frac{T_{\text{дк}}s + 1}{\tau s + 1} = \frac{0,0833s + 1}{0,001s + 1}.$$

Находим новую желаемую передаточную функцию

$$W'_{\text{ж}}(s) = W_{\text{дк}}(s)W_{\text{ж}}(s) = \frac{T_{\text{дк}}s + 1}{\tau s + 1} \frac{K_{\Omega}(T_2s + 1)}{s(T_1s + 1)(T_3s + 1)} =$$

$$= \frac{0,0833s + 1}{0,001s + 1} \frac{21,746s + 26,98}{0,0627s^3 + 1,688s^2 + s} = \frac{1,826664s^2 + 24,0123s + 26,98}{0,0000627s^4 + 0,064388s^3 + 1,689s^2 + s}.$$

Определяем ЛАЧХ регулятора положения с учетом передаточной функции $W'_{\text{ж}}(s)$. Аппроксимируем полученную ЛАЧХ пятью асимптотами и вычисляем параметры передаточной функции регулятора положения $W'_{\text{рп}}(s)$.

$$W'_{\text{рп}}(s) = \frac{k'_{\text{рп}}(T'_2s + 1)(T'_3s + 1)}{(T'_1s + 1)(T'_4s + 1)} = \frac{4,467(s + 1)(0,0154s + 1)}{(1,98s + 1)(0,001s + 1)}.$$

Результаты повторного моделирования представлены на рис. 4, 5.

$\alpha_3(t), \alpha(t), \text{ рад}$

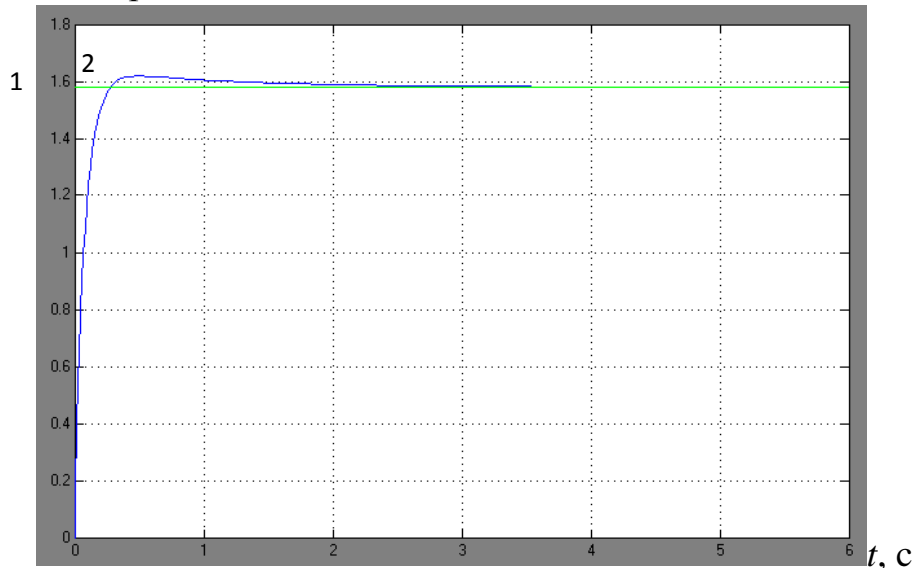


Рис. 4. Графики зависимостей: 1) $\alpha_3(t)$; 2) $\alpha(t)$ при ступенчатом задающем воздействии

Очевидно, что фактическое значение ошибки не изменилось и в обоих случаях составляет

$$\Delta\alpha_{\Omega_{\text{факт}}} = 0,003 \cdot 57 \cdot 60 = 10,3 \text{ угл. мин} < \Delta\alpha_{\Omega} = 15 \text{ угл. мин}$$

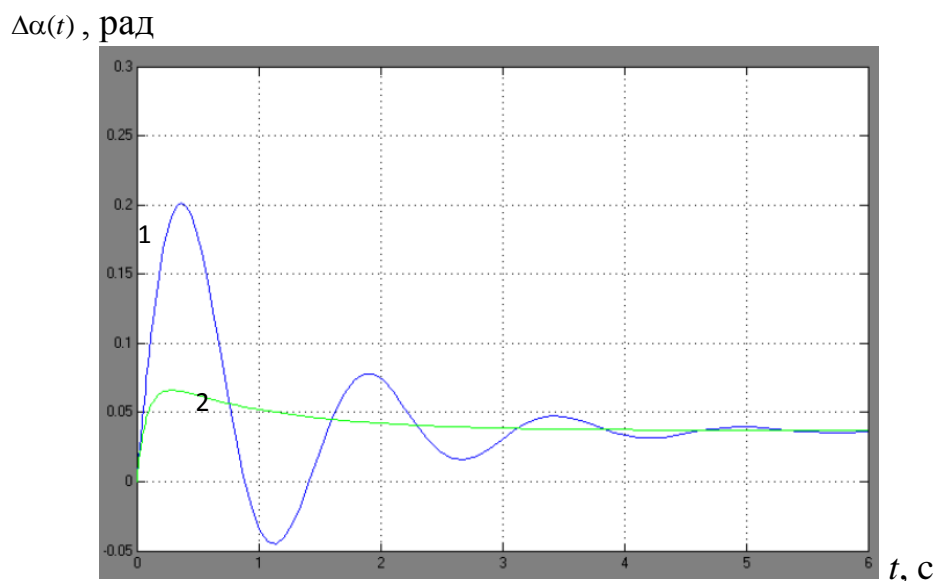


Рис. 5. Графики ошибки $\Delta\alpha(t)$ при линейно возрастающем задающем воздействии: 1) с регулятором $W_{\text{рп}}(s)$; 2) с регулятором $W'_{\text{рп}}(s)$

Таким образом, электропривод с регулятором положения $W'_{\text{рп}}(s)$ функционирует с требуемым значением установившейся ошибки и значительно меньшей колебательностью переходного процесса.

Список литературы

1. Бесекерский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического управления / В.А. Бесекерский, Е.П. Попов. – 4-е изд., перераб. и доп. – СПб.: Профессия, 2004.
2. Теория автоматического регулирования / Под ред. В.В. Солодовникова. – М.: Машиностроение, 1967.

SYNTHESIS OF HIGH-PRECISION CONTROL SYSTEMS OF ELECTRIC DRIVES WITH APPLICATION OF MATLAB SIMULINK

N.A. MALYOV, O.V. POGODITSKIY, T.N. LVOVA, E.P. TUKAEVA
FSBEI HPE «Kazan power-engineering university», Kazan

Annotation. The engineering method of synthesis of a regulator of position for the floating electric drives, providing high accuracy and small oscillatory transients is considered. The procedure of the expected desirable transfer function of the system with application of a differentiating contour of the first order is shown.

The example of synthesis and modeling of a control system of the electric drive with first order of astaticism is showed.

Keywords: synthesis, regulator, astaticism, accuracy, oscillatory.

УДК 621.10+536.5

ПРОТОЧНЫЕ ЭЛЕКТРОГЕНЕРАТОРЫ

Р.С. КАШАЕВ, М.В. МАТВЕЕВ, И.А. ШИПИЛОВ

ФГБОУ ВПО «Казанский государственный энергетический университет»,
г. Казань

Аннотация. В работе предлагаются устройства выработки электроэнергии для питания датчиков и приборов на трубопроводах посредством использования энергии потока жидкости в трубопроводе. Принцип генерации - на индукционный и магнитогидродинамический эффекты.

Ключевые слова: выработка электроэнергии, поток жидкости, индукционный, магнитогидродинамический эффект.

Проблема получения электроэнергии от потоков жидкостей и газов в трубопроводах возникла в связи с необходимостью питания датчиков и приборов, установленных на трубопроводах в труднодоступных и удаленных районах нефтедобычи и нефтегазоперекачки. ОАО «Татнефть» предложило Казанскому государственному энергетическому университету проработать данный вопрос, выставив техническое задание на проточный генератор электропитания расходомеров ($U = 24$ В, $I = 4$ А). Федеральный закон №261-ФЗ «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности» также стимулирует развитие энергосберегающей энергетики.

Разрабатываемые в работе проточные источники электропитания (ПИЭ) предназначены для выработки электроэнергии на эффекте электромагнитной индукции (ЭМИ) и магнитогидродинамическом (МГД) эффекте, возникающих от потока проводящей жидкости (воды, скважинной жидкости) в трубе. Они могут быть применены, например, в качестве автономных ПИЭ для расходомера контроля объема жидкости закачиваемой воды в пласт на нагнетательных скважинах. Тем самым может быть решена проблема электропитания расходомеров и передачи информации с нагнетательных скважин, находящихся на большом удалении от источников электропитания.

1. Индукционный проточный электрогенератор

Одним из способов достижения поставленной цели является использование явления электромагнитной индукции Фарадея. Суть

явления заключается в том, что при движении проводника в магнитном поле, в нем индуцируется (наводится) электрический ток. В нашем случае роль проводника выполняет поток жидкости. При изменении магнитного потока $\Delta\Phi$ за время Δt в проводящем контуре возникает ЭДС индукции:

$$\varepsilon_{\text{инд}} = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}. \quad (1)$$

При движении среды в магнитном поле B со скоростью v в каждой точке кроме стороннего электрического поля E наводится электрическое поле («поле движения») $E_v = v \times B$ и полная напряженность электрического поля равна $E' = E + v \times B$.

Кроме этого фундаментальным выражением для описания явления является закон Ома, устанавливающий связь между электрическим и магнитным полями с одной стороны и электрическим током с другой. В отсутствие эффекта Холла он имеет вид

$$j = \sigma E' = \sigma(E + v \times B), \quad (2)$$

Коэффициент пропорциональности σ между j и E' есть удельная электрическая проводимость среды. Фактически это проявление явления магнитогидродинамики (МГД), то есть эффекта отклонения траектории движения заряженных частиц в магнитном поле под действием силы Лоренца, представляющей собой произведение величины заряда q на векторное произведение скорости потока частиц v на величину магнитной индукции поля B и описываемую формулой:

$$F_L = q \cdot v \times B. \quad (3)$$

Если активной зоной ЭМП является газообразный проводник (плазма) или полупроводник, то может заметно проявиться эффект Холла, и закон Ома примет вид

$$j = \sigma(E + v \times B) - \frac{\beta}{B} j \times B, \quad (4)$$

где $\beta = \omega_e \tau_e$ – безразмерный параметр Холла; ω_e – циклотронная частота вращения электрона в магнитном поле; τ_e – время между его последующими соударениями с другими частицами. Соотношение (4) называют обобщенным законом Ома. Наиболее эффективное

преобразование механической энергии потока частиц в электрическую будет наблюдаться при максимальном значении F_3 , когда вектор расстояния между электродами \mathbf{l} и \mathbf{B} взаимно ортогональны и

$$F_3 = Bil. \quad (5)$$

Электромеханические преобразователи, использующие эффект электромагнитной индукции, называются индуктивными и фактически являются основой поточного расходомера. Требуется только конструктивно и физически усилить эффект индукции для генерации значительной ЭДС. Поэтому полезно рассмотрение различных вариантов перспективных с точки зрения генерации тока патентов расходомеров.

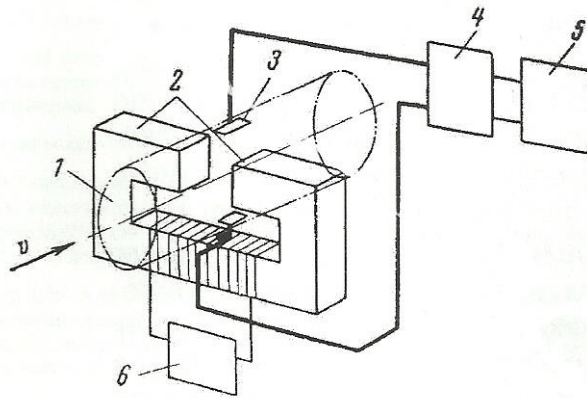


Рис. 1. Индукционный расходомер

На рис. 1 изображена схема приемника индукционного расходомера. Трубопровод 1, по которому протекает проводящая жидкость, расположен между полюсами магнита 2 перпендикулярно направлению силовых линий магнитного поля.

Датчики индукционных (как и МГД) преобразователей не имеют выступающих внутрь трубопровода частей, сужений или изменений профиля. Благодаря этому гидравлические потери на датчике минимальны. Их можно чистить и стерилизовать без демонтажа. Отсутствие полых углублений исключает застаивание и коагулирование измеряемых жидкостей. На результат измерения не влияют взвешенные в жидкости частицы и пузырьки газа, профиль поля скоростей.

Диапазон расходов, требуемых в ТЗ ОАО «Татнефть» составляет $Q = 0 \div 50$ т/сутки. Это соответствует $Q = 0 \div 0,014$ м³/сек. Если брать внутренний диаметр трубы в $\varnothing = 0.1$ м (для закачки воды), то учитывая,

что расход $Q = v \cdot S$, где v – скорость потока в м, S – сечение трубы в м², получим диапазон скоростей $v = 0 \div 4.6$ м/с. Возьмем диапазон скоростей, принятый для промышленных расходомеров $v = 0 \div 12$ м/с. Тогда, учитывая, что под действием магнитного поля $B = 10\,000$ Гаусс = 1 Тл, ионы, находящиеся в жидкости (проводимость жидкости должна быть не менее $5 \cdot 10^{-5}$ См·м) отдают свои заряды электродам 3 (рис. 1), создавая на них ЭДС ε , пропорциональную скорости потока в соответствии с уравнением:

$$\varepsilon = B \cdot v \cdot \varnothing \cdot k \text{ (мВ)} \quad (6)$$

где v – в см/с, \varnothing – в см, k – коэффициент, пропорциональный проводимости жидкости. Возьмем средний $k = 10^{-4}$. Подстановка значений $B = 10\,000$ Гаусс, $v = 12$ м/с, $\varnothing = 0.01$ м дает $\varepsilon = 0.12$ В. Формула написана для случая постоянного магнитного поля. Если поле меняется с частотой f , то величина ε будет определяться уравнением:

$$\varepsilon = B_{\max} \cdot v \cdot \varnothing \cdot \sin 2\pi f \cdot 10^{-5} \quad (7)$$

Выражая скорость течения через объемный расход Q получим:

$$\varepsilon = 3,6 \cdot 10^{-4} \cdot Q \cdot B / \varnothing \quad (8)$$

В нашем случае постоянного напряжения используя формулу (6) очевидно, что для достижения значения в $\varepsilon = 24$ В необходимы 24 канала протока рабочей среды. Методом повышения ЭДС в генераторе является также повышение электропроводности σ рабочей среды, которого можно добиться использованием трибоэлектрического эффекта, который использован, например в патенте РФ на изобретение [1]. Согласно патента движущаяся жидкость заряжается отрицательно, а на внутренней поверхности трубопровода из политетрафторэтилена, нейлона образуются положительные заряды. Переменное сечение трубы выполняет также роль турболизатора, обеспечивающего закручивание движущейся жидкости по винтообразной траектории. Движущаяся жидкость представляет собой систему движущихся отрицательных зарядов и является конвективным током, вокруг которого возникает магнитное поле. Это поле взаимодействует с постоянным или переменным магнитным полем, в соответствии с формулами (6–8) вырабатывая ЭДС.

Нами предлагается вариант индукционного генератора, в котором осуществляется взаимодействие линейно перемещающегося магнитного поля B с движущейся проводящей средой. Пусть в канале (рис. 2) среда движется вдоль оси со скоростью v , а поперечное магнитное поле со скоростью $v_B \neq v$.

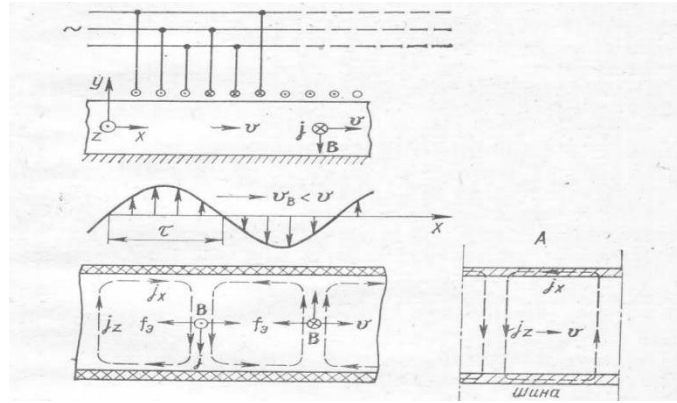


Рис. 2. Индукционный канал
с линейно смещающимся магнитным полем

Тогда каждый элемент среды движется в магнитном поле с относительной скоростью $(v - v_B)$ и за счет эффекта Фарадея в нем наводится электрическое поле и течет ток плотностью j . Благодаря взаимодействию j и B в канале создается электромагнитная сила $f_3 = j \cdot B$. Если $v < v_B$, т.е. рабочее тело отстает от бегущего магнитного поля, то каждый элемент среды будет перемещаться влево относительно поля и электромагнитная сила f_3 будет направлена в сторону движения поля и ускорит рабочее тело. То есть активная электрическая энергия, потребляемая обмоткой, преобразуется в механическую энергию потока и канал будет работать в режиме насоса (ускорителя).

Если же $v > v_B$, т.е. рабочее тело опережает бегущее магнитное поле, то элементы среды перемещаются вправо относительно поля (рис. 2). Изменится и направление ЭМ силы f_3 , которая будет препятствовать движению рабочего тела. Часть механической энергии, затрачиваемой на преодоление тормозящей силы преобразуется в активную электрическую энергию, генерируемую в обмотке и питающую нагрузки в сети, к которой подключена обмотка. Теперь канал работает в генераторном режиме.

Бегущее электромагнитное поле можно преобразовать во вращающееся магнитное поле (ВМП). Это дает еще один вариант индукционного генератора, в котором осуществляется взаимодействие ВМП с движущейся проводящей средой (рис. 3). Вводя понятие

скольжения $s = (v_B - v)/v_B$ также, как и в классических асинхронных машинах имеем генераторный режим при $-\infty < s < 0$.

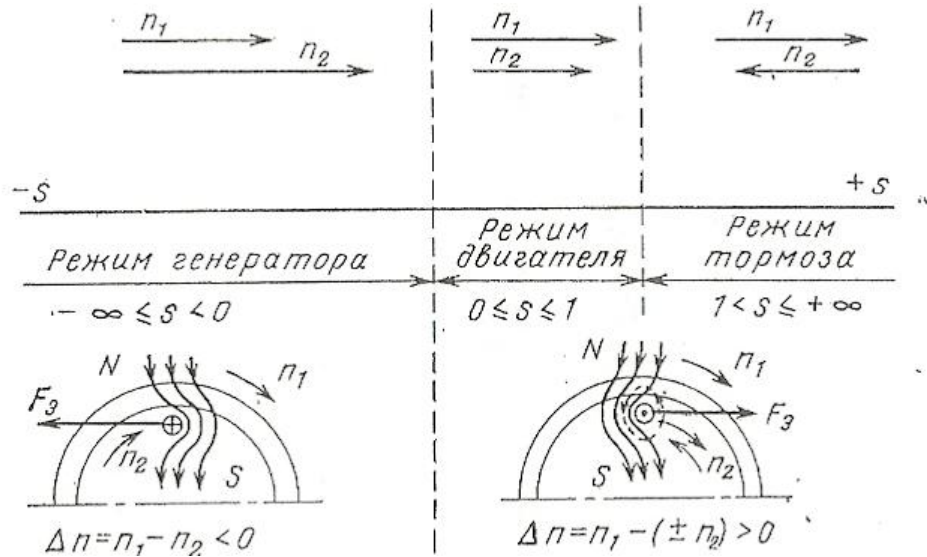


Рис. 3. Индукционный канал с вращающимся магнитным полем

Если линейная скорость $v = \omega_0 R$ будет $v > v_B$, (ω_0 – угловая скорость ВМП, R – радиус винтового проточного канала), т.е. рабочее тело опережает линейную скорость ВМП и канал работает в генераторном режиме. Для усиления эффекта нами предлагается в поток рабочего тела поместить магнитную турбинку, создающую дополнительный эффект взаимодействия среды с ВМП. В этом случае взаимодействие будет осуществляться и в отсутствие напряжения в статорных обмотках, создающих ВМП.

2. Проточный МГД-генератор

МГД-генератор (МГДГ) – энергетическая установка, в которой так же, как и в индукционных генераторах, процесс генерирования электрического тока в МГДГ основан на явлении электромагнитной индукции, и отличие в том, что в нём при движении среды поперёк магнитного поля возникают противоположно направленные потоки носителей зарядов противоположных знаков. Генерирование электроэнергии идёт за счёт преобразования части кинетической или потенциальной энергии потока электропроводной жидкости практически при постоянной температуре.

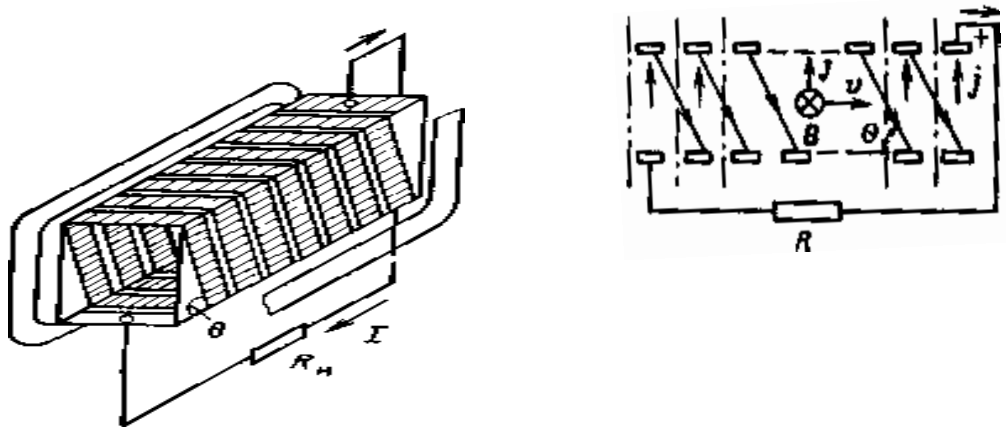


Рис. 4. Конструкция токосъемных электродов в МГДГ

По способу отвода электроэнергии МГДГ разделяют на кондукционные и индукционные. В кондукционных электрический ток через съёмные электроды, вмонтированные в боковые стенки канала, замыкается на внешнюю цепь. Такой МГДГ может генерировать постоянный или пульсирующий ток. В индукционных МГДГ электроды отсутствуют, генерируется только переменный ток и требуется создание магнитного поля, бегущего вдоль канала. По системам соединений электродов различают: фарадеевский генератор со сплошными или секционированными электродами, холловский генератор, в котором расположенные друг против друга электроды коротко замкнуты, а напряжение снимается вдоль канала и серийный генератор с диагональным соединением электродов (рис. 4). Диагональный МГДГ обладает хорошими рабочими характеристиками, что связано с простотой нагрузочной цепи, устойчивой работой. Связь между электромагнитными параметрами устанавливается обобщенным законом Ома, который запишем в проекциях на оси x и z :

$$j_x = \beta j_z - \sigma E_x; \quad (9)$$

$$j_z = \sigma(v_x B_y - E_z) - \beta j_x, \quad (10)$$

Таким образом, распределение тока в канале при $\beta \geq 1$ является двумерным. Электромагнитная сила $f_s = j \times B$ также имеет две компоненты: $f_{zx} = -j_z B_y$; $f_{zz} = j_x B_y$. Сила f_{zx} стремится изменить скорость потока v_x , т.е. способствует изменению механической энергии потока, благодаря чему осуществляется взаимное преобразование механической и электрической энергии. В МГДУ понятие ротора отсутствует и скорость

деформируемой среды может меняться от точки к точке вместе с такими параметрами как давление, плотность, температура, проводимость. Поэтому кроме уравнений электродинамики и механики для анализа процессов в МГД-канале в общем случае необходимо применять гидродинамические уравнения движения, неразрывности, энергии и другие, учитывающие роль электромагнитных эффектов.

Известны устройство МГДГ и способ генерации электрической энергии, посредством организации движения проводящей среды по замкнутому каналу, когда полученную электрическую энергию снимают электромагнитными обмотками. Однако, по мнению авторов патента [2] данное устройство имеет низкий КПД, является достаточно сложным, имеет низкую надежность. По патенту [2] устройство усовершенствовано и электрическую энергию получают на ЭМ-обмотках замкнутого канала, по которому организуют движение воды с помощью бегущего магнитного поля, создаваемого ЭМ обмотками возбуждения. Воду ионизируют добавлением тяжелой воды и на режиме запуска генератора ее дополнительно ионизируют высоковольтными разрядами. При движении воды возникают свободные электроны и выделяется дополнительная энергия за счет трения воды о диэлектрический слой, электростатических пробоев кавитационно-вакуумных структур и происходящей реакции холодного ядерного синтеза [2].

В МГДГ роторного типа по патенту [3] используется свойство обратимости униполярной электрической машины и способ организации течения рабочей среды с использованием проницаемых пористых материалов. Примером униполярного генератора является «диск Фарадея», содержащий электропроводящий диск, приводимый во вращение, постоянный магнит, создающий поле параллельно оси вращения диска и двух токосъемников – один на оси диска, другой – у края диска. В результате, при вращении диска возникает ЭДС между его центром и краем. Усовершенствованием диска является динамо-машина или генератор с самовозбуждением на постоянных магнитах Николы Тесла [4], представляющий совмещение двух дисков, расположенных в одной плоскости и электрически связанных гибким проводящим ремнем по периферии. Токосъем осуществляется через осевые подшипники, в которых закреплялись и приводились в движение диски. Такая схема позволяет в два раза повысить ЭДС электрической машины.

Еще одно техническое решение - устройство роторного типа [5]. В нем ротор выполнен из проницаемого ячеистого материала с образованием каналов внутри тела ротора для протекания рабочей среды.

МГДГ роторного типа содержит параллельно установленные в корпусе дисковые роторы с возможностью встречного вращения с электрическим контактом между ними на электропроводящих участках валов роторов, чередующихся с изолированными участками валов в шахматном порядке и коллекторы подвода и отвода рабочей среды. Каждая пара дисков роторов размещена между полюсами постоянных магнитов (рис. 5).

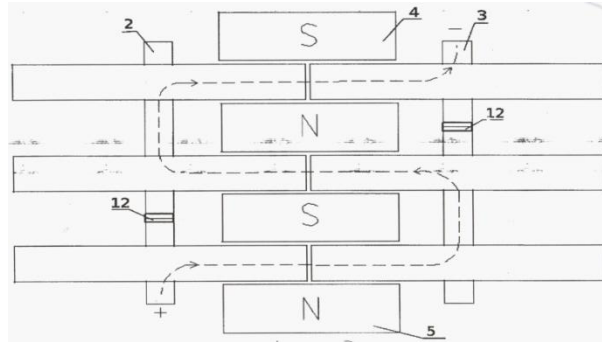


Рис. 5. Условная схема МГДГ по патенту [6]

Наиболее близким к предлагаемому нами решению конструкции МГДГ является патент [6] (рис. 6.). Данный МГДГ состоит из корпуса из двух участков труб – внутренней и наружной, охватывающего двенадцать каналов, сужающихся от наружной трубы к внутренней. Через каналы проходит жидкий металл. Между каналами расположены постоянные магниты, создающие в каналах магнитный поток. В результате взаимодействия протекающего через каналы тока с потоком в каналах в жидком металле наводится ЭДС. Изобретение имеет недостатки, заключающиеся в сложности конструкции из-за большого числа постоянных магнитов, сложным образом расположенных для формирования каналов потока жидкости.

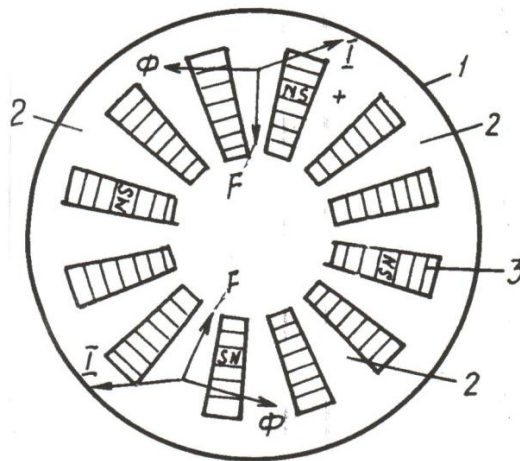


Рис. 6. Электрическая машина радиального движения жидкости.

Вид сверху

Недостаток патента-прототипа может быть устранен изменением конструкции в виде, представленном на рис. 7.

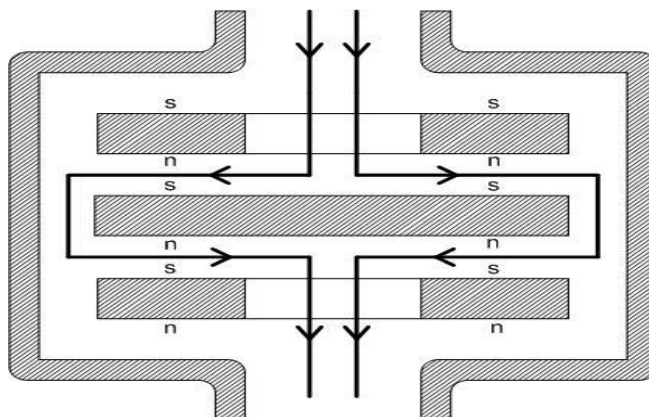


Рис. 7. Конструкция предлагаемого МГД-генератора

Особенность конструкции заключается в том, что поток жидкости входит в цилиндрический канал ферромагнитного корпуса (форма трансформатор «горшкового» типа) и далее осуществляет движение в радиальном направлении по 24 каналам (рис. 7), боковые стенки которых представляют собой разнополярные электроды. Внутри корпуса расположены два кольцевых и один дисковый постоянных магнита поля которых пронизывают потоки жидкости перпендикулярно вектору скорости ее движения. В результате на ионы солей в жидкости (образующие ее проводимость) действует силы Лоренца, которые смещают заряды к стенкам каналов, тем самым формируя ЭДС ε .

Если использовать квадратное сечение каналов с расстоянием между электродами равным 0,01 м, то согласно формуле индукции при магнитном поля $B = 10\,000$ Гаусс = 1 Тл, проводимости жидкости не менее $5 \cdot 10^{-5}$ См·м, скорости потока $v = 12$ м/с, между электродами в каналах возникнет ЭДС $\varepsilon = 120$ мВ. При наличии 24 каналов с использованием конструкции рис. 7 и при последовательном соединении электродов каналов получим ЭДС $\varepsilon = 28$ В. Вторым назначением устройства может быть его использование в качестве высокоточного расходомера, осуществляющего отсчет скорости потока по значению ЭДС в зависимости от скорости $v = 0-12$ м/с.

Обычно принятая практика установки индукционных расходомеров, таких как расходомер-счетчик электромагнитный «Взлет ЭМ», осуществляется по схеме, представленной на рис. 8.

Потери напора h_H (в м водяного столба) в месте установки устройства в трубопроводе складываются из потерь напора в конфузоре

$h_{Н1}$, которые определяются по графику рис. 9. Для определения скорости потока жидкости по значению объемного расхода Q можно использовать и формулу:

$$V(\text{м/с}) = Q(\text{м}^3/\text{ч}) \cdot 10^3 / 0,9\pi D_2^2(\text{мм}) \quad (11)$$

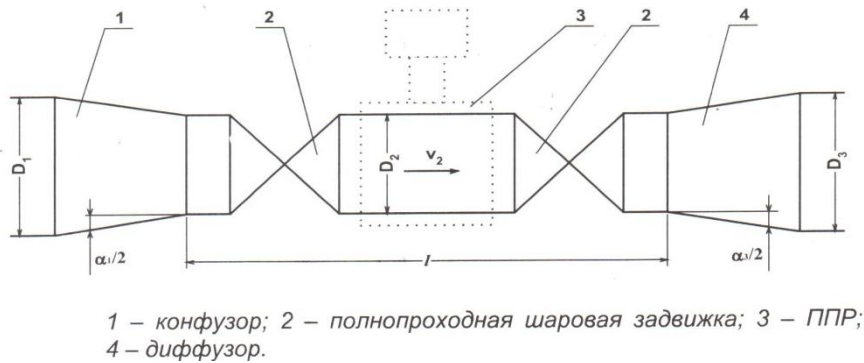


Рис. 8. Схема подключения расходомера на трубопроводе

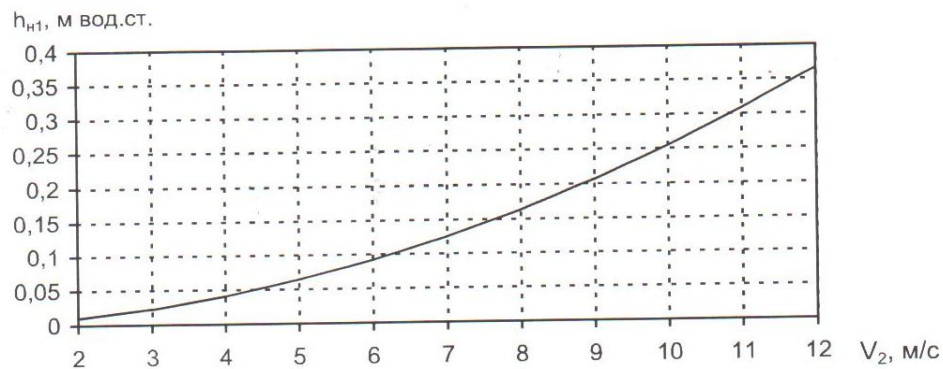


Рис. 9. Определение потерь напора в конфузоре $h_{Н1}$

Из графика видно, что максимальная потеря напора тем больше, чем больше отношение l/D_2 длины линейного участка к диаметру выходного участка (конфузора) и достигает величины $h_{Н2} = 10$ м.в.ст. при $l/D_2 = 30$. Это необходимо учитывать для минимизации потерь давления на приборе.

Список литературы

1. Устройство для измерения расхода электропроводящих жидкостей / Заренкова В.А., Заренкова Д.В., Дикарева В.И.: патент 2242721 Рос. Федерации, заявл. 2003107778/28 от 12.03.2003, опубл. 20.12.2004.
2. Способ получения электрической энергии и МГД-генератор Грицкевича для ее осуществления / Грицкевич О.В., Грицкевич Б.О.:

патент 2183899 Рос. Федерации, заявл. 99118347/09 от 24.08.1999, опубл. 20.06.2002.

3. Многофункциональная магнитогидродинамическая (МГД) машина/ Баев В.К., Кацнельсон С.С., Сюняков С.А., Коротких А.Я: патент 2492570 Рос. Федерация, заявл.2003109354/06 от 02.04.2003, опубл. 10.10.2004.

4. Динамо Электрическая машина / Никола Тесла патент № 406968. Заявл.16.07.1889.

5. Способ организации течения рабочей среды и энергообразующее устройство роторного типа для его осуществления / Баев В.К., Фомин В.М., Чусов Д.В. и др.: патент 2256861, Рос. Фед., заявл. 2003109354/06 от 02.04.2003, опубл. 20.07.2005.

6. Электрическая машина радиального движения жидкости / Курбасов А.С. патент №2346378 Рос.Фед., заявл. 2007139044/09 от 23.10.2007, опубл. 10.02.2009.

FLOW ELECTRIC GENERATORS

R.S. KASHAEV, M.V. MATVEEV, I.A. SHIPILOV
FSBEI NPE «Kazan power-engineering university», Kazan

Annotation. In the work proposed designs of electric generators for power supply of probeheads and designs on the pipelines using energy of liquid flow and induction and magnetohydrodynamic effects.

Key words: electric generation, liquid flow, induction and magnetohydrodynamic effects.

УДК 621.313.3

ПРИМЕНЕНИЕ НЕЛИНЕЙНЫХ СПОСОБОВ УПРАВЛЕНИЯ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА

Б.П. СМОЛЯКОВ, А.А. ШИГАПОВ

ФГБОУ ВПО «Казанский государственный энергетический университет»,
г. Казань

Аннотация. Рассматривается модифицированная система прямого управления моментом асинхронного двигателя с применением нейросетевого блока идентификации параметров электропривода и нейро-фаззи регулятора скорости вращения ротора. Выявлены недостатки стандартной системы ПУМ АД и описан синтез нейросетевых элементов для модификации системы и устранения этих недостатков. Приведены результаты моделирования модифицированной системы ПУМ АД с нейросетевыми и нейро-фаззи компонентами.

Ключевые слова: прямое управление моментом, нейронные сети, фаззи логика.

Одной из наиболее актуальных задач в области электропривода является модификация существующих систем управления путем применения новых нетрадиционных методов и алгоритмов управления. Примером таких нетрадиционных методов является применение искусственных нейронных сетей (ИНС) и фаззи логики. Данные средства управления имеют большой потенциал в повышении качественных характеристик системы управления электропривода.

Система прямого управления моментом асинхронного двигателя (ПУМ АД) является одним из наиболее перспективных способов управления асинхронным двигателем. Однако недостатки системы, такие как пульсация электромагнитного момента, не могут быть в полной мере устранены существующими на данный момент средствами. В связи с этим, поиск новых нетрадиционных методов и алгоритмов для устранения этих недостатков и дальнейшего повышения качественных характеристик системы является актуальной задачей в области электропривода. Несмотря на огромный потенциал, исчерпывающие исследования в области применения нетрадиционных методов управления в системе ПУМ, до сих пор отсутствуют. Среди существующих можно выделить работу китайских

исследователей [1], в которой описан синтез нейросетевого наблюдателя потокосцепления статора, изменяющегося в процессе работы электродвигателя из-за непостоянного текущего значения сопротивления. Другим примером применения ИНС в системе ПУМ является разработка, опубликованная в журнале IJAREEIE [2]. Ее авторы предлагают использовать ИНС в качестве идентификатора угла между потокосцеплениями статора и ротора, а также сектора, в котором на данный момент находится вектор потокосцепления статора. Вся эта информация необходима для выбора оптимальной комбинации ключей инвертора и для поддержания необходимых характеристик работы электропривода.

В данной статье рассмотрена модифицированная система прямого управления моментом асинхронного двигателя с применением нейросетевой идентификации и нейро-фаззи регулятора скорости (НРС). Такая модификация системы ПУМ может стать промежуточным этапом к переходу на более сложные системы управления.

Система прямого управления моментом асинхронного двигателя

В основе принципа прямого управления моментом лежат два выражения: уравнение равновесия напряжений статорной цепи в неподвижной системе координат (1) и выражение для электромагнитного момента двигателя, записанного через потокосцепления статора и ротора в неподвижной системе координат (2).

$$\vec{U}_{s\alpha-\beta} = R_s \vec{I}_{s\alpha-\beta} + \frac{d}{dt} \vec{\Psi}_{s\alpha-\beta} \quad (1)$$

$$M_{\Omega} = \frac{3}{2} Z_p \frac{k_s}{\sigma L_r} (\Psi_{s\alpha} \Psi_{r\beta} - \Psi_{s\beta} \Psi_{r\alpha}) \quad (2)$$

Структурная схема системы ПУМ АД представлена на рис. 1.

Как и любой электропривод, данную структуру можно разделить на две части: силовую и информационную. Силовая часть включает в себя сеть, выпрямитель, автономный инвертор напряжения на IGBT транзисторах и асинхронный двигатель.

Информационная часть содержит: задатчики скорости, момента и потокосцепления, компараторы момента и потокосцепления, датчики скорости, токов и напряжения. Также к информационному каналу относится блок идентификации потокосцепления и электромагнитного момента.

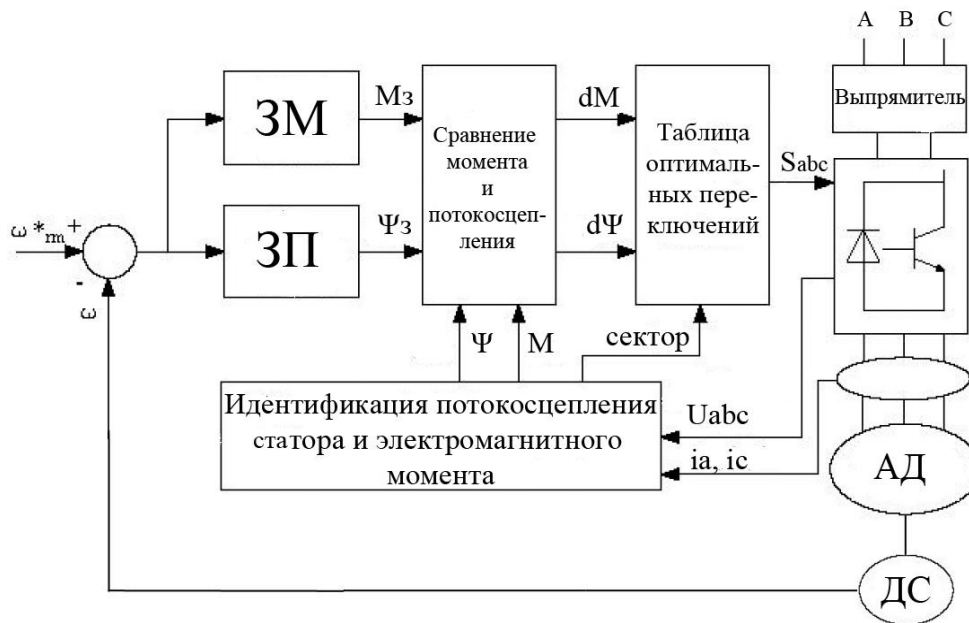


Рис. 1. Структурная схема системы прямого управления моментом АД

Принцип действия данной системы: сигнал задатчика скорости ω_{rm}^* сравнивается с сигналом обратной связи ω , поступающим с датчика скорости. Далее разница этих сигналов поступает на задатчик момента и потокосцепления. Задающие сигналы момента и потокосцепления M_3 и Ψ_3 попадают на соответствующие компараторы, где сравниваются с сигналами, поступившими с блока идентификации – M и Ψ . Выходной сигнал компаратора момента dM может принимать три значения: $-1, 0, 1$ – если величину нужно увеличить, держать на том же уровне или уменьшить, соответственно. Выходной сигнал компаратора потокосцепления статора $d\Psi$ может принимать два значения – 0 или 1 . Сигналы с компараторов вместе с номером сектора нахождения вектора потокосцепления статора попадают в таблицу оптимальных переключений, где по этим трем сигналам выбирается необходимая комбинация ключей инвертора.

Результаты моделирования данной системы (рис. 2 сверху-вниз графики: тока фазы А, скорости вращения ротора, электромагнитного момента, напряжения на выходе выпрямителя) показали, что система обеспечивает поддержание скорости на необходимом уровне, но обладает серьезным недостатком – большой пульсацией момента. Для устранения данных недостатков и повышения качественных характеристик системы была предложена модифицированная система ПУМ АД.

Главным отличием модифицированной системы ПУМ АД (рис. 3) является наличие нейросетевого блока идентификации (НБИ) параметров

электропривода и нейро-фаззи регулятора скорости (НРС) вращения. Введение этих элементов в структуру ПУМ АД позволяет понизить влияние окружающей среды на работу системы управления (минимальное количество датчиков), повысить ее адаптивность и снизить пульсации электромагнитного момента.

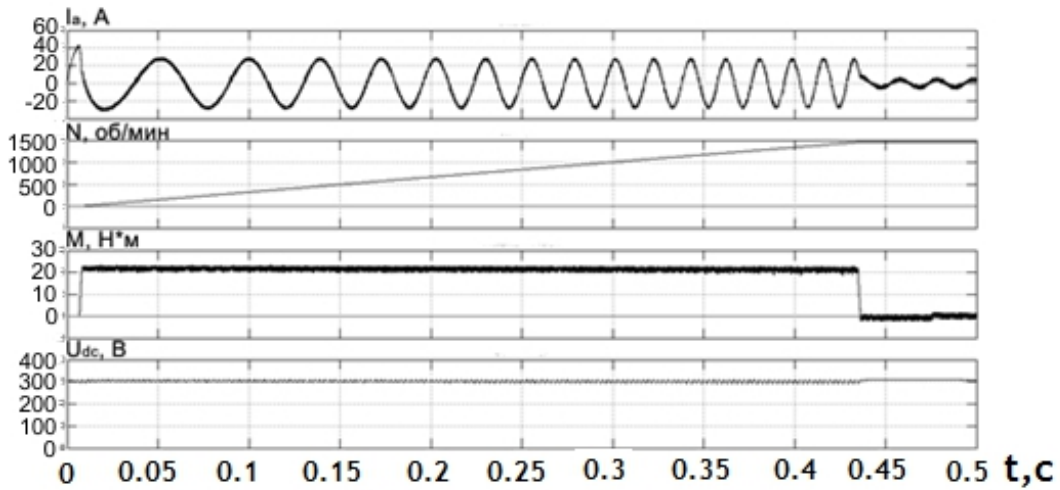


Рис. 2. Результаты моделирования системы ПУМ АД

Модифицированная система управления ПУМ АД

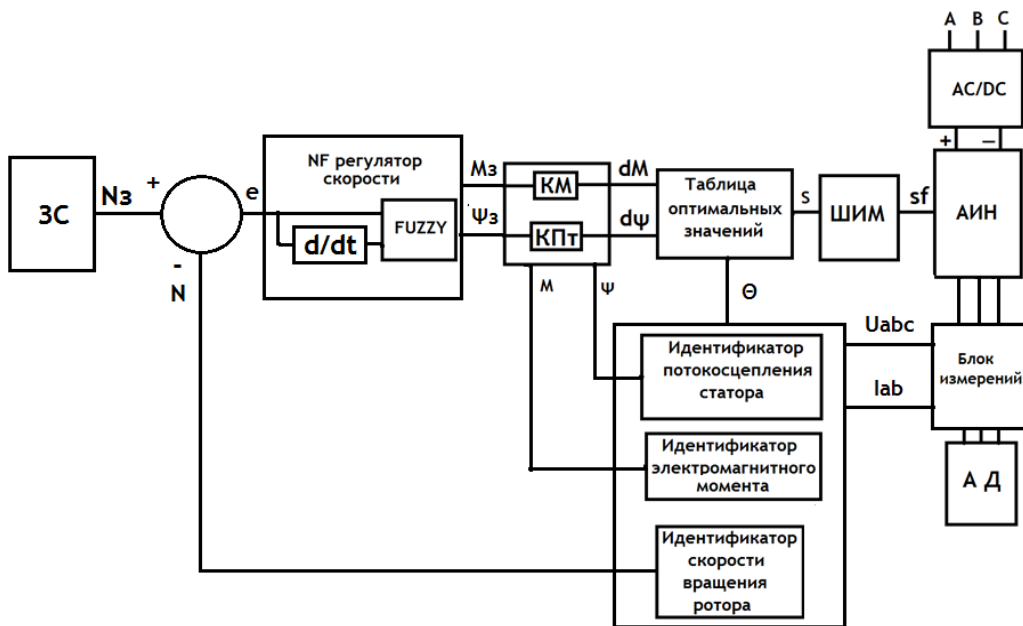


Рис. 3. Модифицированная система ПУМ АД

Как следует из названия НБИ, его задачей является определение параметров электропривода. Данный блок состоит из трех элементов: идентификаторов потокосцепления статора, электромагнитного момента и скорости вращения ротора. В качестве идентификаторов используются сети радиально-базисных функций (РБФ) с одним скрытым слоем нейронов. На вход ИНС идентификатора потокосцепления статора поступают как прямые, так и обратные значения тока и напряжения, а также задержанное на один шаг значение потокосцепления статора. Выходным является сигнал потокосцепления статора, который далее поступает на ИНС идентификатор скорости вращения ротора и компаратор потокосцепления КП. В случае ИНС идентификатора электромагнитного момента, кроме сигналов тока и напряжения, на него поступает задержанный на один шаг сигнал электромагнитного момента. Выходное значение также поступает на компаратор момента КМ и ИНС идентификатор скорости вращения ротора. Последний обладает наиболее сложной структурой, предполагающей 9 входных сигналов: прямые и обратные сигналы тока, напряжения, потокосцепления статора и электромагнитного момента, а также задержанный сигнал скорости вращения ротора.

Обучение ИНС идентификаторов осуществлялось в среде Matlab с использованием средств библиотеки Neural Network Toolbox. Для обучения каждого из элементов использовалось порядка миллиона наборов входных и соответствующих им выходных значений. Максимальное время обучения составило 35,5 часа – для идентификатора электромагнитного момента.

Точность идентификации на уровне математического моделирования составила: для ИНС идентификатора потокосцепления статора – 99,99 %, для идентификатора скорости вращения – 100 %, а для идентификатора момента – 99,97 %. Снижение точности идентификации в случае с идентификатором момента происходит в результате значительной пульсации функции.

Также результатом обучения идентификаторов стала значительная генерализация или обобщение данных – эта характеристика позволяет идентификатору не только определять выходные значения функции по величинам отсутствующим в обучающей выборке, но и значительно повысить адаптивность системы, убирая шумы и снижая пульсации определяемого параметра.

Результаты моделирования системы ПУМ АД с нейросетевым блоком идентификации показаны на рис. 4. На нем изображена отсекаемая амплитуда пульсаций электромагнитного момента. Т.е. уменьшение амплитуды пульсаций электромагнитного момента, достигнутое за счет

применения ИНС идентификатора. На основе полученного графика электромагнитного момента можно наблюдать, что амплитуда пульсации этой величины снижается на 50 %. Такое снижение позволяет в значительной степени повысить точность регулирования, и, соответственно, эффективность управления электроприводом.

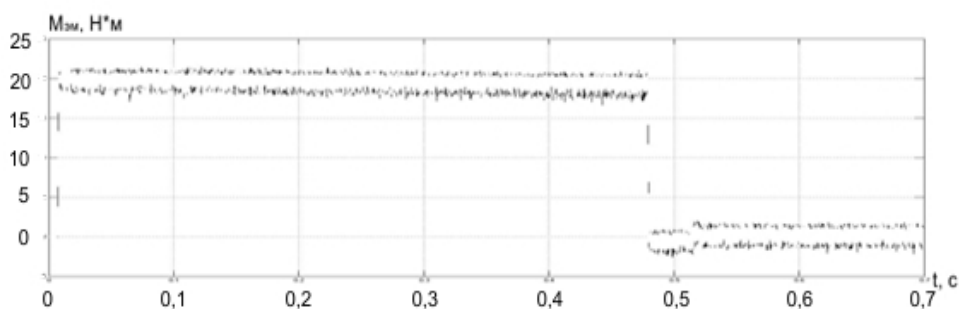


Рис. 4. Снижение амплитуды пульсаций электромагнитного момента

Нейро-фаззи регулятор скорости

Вторым дополнением модифицированной системы ПУМ АД является НРС. Он представляет собой ИНС, обученную на основе фаззи ПИ-регулятора скорости вращения ротора. Фаззи регулятор скорости является ПИ-регулятором с корректировкой пропорционального и интегрального коэффициентов во время работы. Как видно из рис. 3, на вход регулятора подается разница между задающим значением скорости и ее производная (скорость изменения разницы).

Работу данного регулятора можно разбить на три этапа: фаззификация, фаззи воздействие и дефаззификация.

На первом этапе входные величины масштабируются и им присваиваются лингвистические переменные. Для фаззи регулятора скорости в зависимости от разницы скоростей были приняты следующие лингвистические переменные:

- NegativeBig (NB) – ошибка большая отрицательная;
- NegativeMedium (NM) – ошибка средняя отрицательная;
- NegativeSmall (NS) – ошибка малая отрицательная;
- ZeroOrder (ZO) – отсутствие ошибки
- PositiveSmall (PS) – ошибка малая положительная;
- PositiveMedium (PM) – ошибка средняя положительная;
- PositiveBig (PB) – ошибка большая положительная.

Для скорости изменения разницы достаточно градация по трем степеням: отрицательная (N), положительная (P), неизменная (ZO).

Таким образом, на третьем этапе работа происходит с выходными лингвистическими переменными. На этапе дефаззификации выходные лингвистически переменные преобразуются в числа по пользовательским функциям.

При этом итоговое вычисление значений коэффициентов П и И происходит по методу Мамдани [3], по следующим формулам:

$$K_p = 5 + 0.8 \cdot (\Delta K_p - 2.5),$$

$$K_i = 0.0125 + 0.003 \cdot (\Delta K_i - 2.5),$$

где ΔK_p и ΔK_i – числа, получаемые после дефаззификации.

Для получения обучающей выборки данных для ИНС было проведено моделирование фаззи регулятора скорости в среде Matlab Simulink с использованием библиотеки Fuzzy Logic Toolbox.

Также стоит упомянуть, что коэффициенты масштабирования перед фаззификацией и дефаззификацией подбираются вручную. При этом от коэффициентов на входе зависит чувствительность регулятора, а от выходных – устойчивость его работы.

На основе выборки, полученной после моделирования фаззи регулятора, был обучен NF-регулятор, представляющий собой РБФ сеть с семью нейронами в скрытом слое и сигналами ее de/dt в качестве входных значений.

Для демонстрации преимуществ NF-регулятора по сравнению с обычным ПИ-регулятором было проведено моделирование системы ПУМ АД с данными регуляторами. Результаты моделирования представлены на рис. 5.

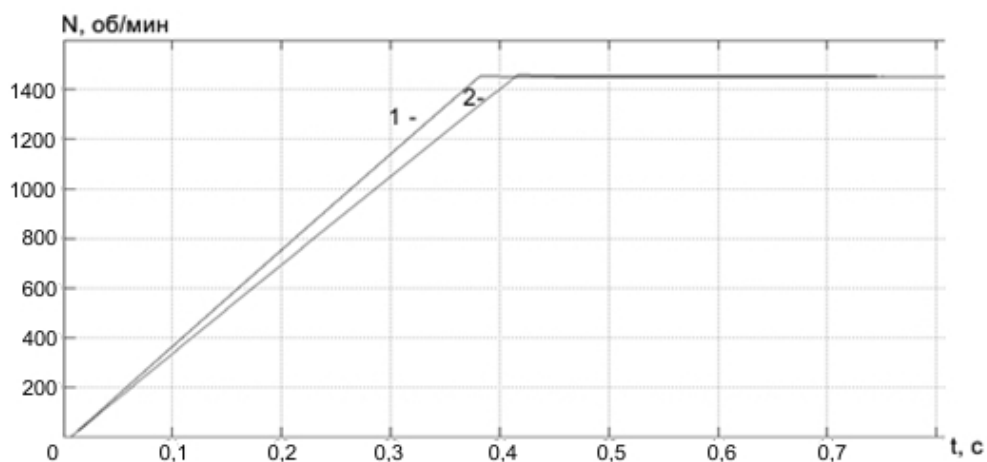


Рис. 5. Сравнение переходного процесса модифицированной и стандартной систем ПУМ АД

По данным результатам видно, что применение NF-регулятора не только позволяет ускорить переходной процесс, но также и уменьшить перерегулирование. Время, за которое ЭП выходит в установившийся режим при использовании обычного ПИ-регулятора составляет 0,75 с. При использовании NF-регулятора привод переходит в установившийся режим за 0,5 с, что в полтора раза быстрее.

Выводы

Применение фаззи регулятора скорости вращения ротора позволяет повысить качество и скорость переходного процесса. В свою очередь, совмещение фаззи регулятора с ИНС позволяет повысить скорость работы самого регулятора, а также повысить его адаптивность, за счет обобщения данных. Полученные результаты моделирования модифицированной системы ПУМ АД с применением НБИ и НРС, позволяют утверждать, что данная система обладает рядом преимуществ: меньшей пульсацией электромагнитного момента, повышенной адаптивностью и высокой точностью идентификации параметров электропривода. Эти преимущества делают возможным применение данной системы в прецизионных электроприводах с переменными нагрузками и открывают пути для дальнейшего повышения качественных характеристик электроприводов и их систем управления.

Список литературы

1. Wang Ping, Li Bin, Huang Ruixiang, Li Guidan. Diangong jishu xuebao Trans. China Electrotech. Soc. – 2003. – 18. – № 2. – P. 5–8.
2. Kusuma Gottapu¹, YV Prashanth², P Mahesh³, Y Sumith. Simulation of DTC IM Based on PI & Artificial Neural Network Technique. International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering Vol. 2, Issue 7, July 2013.
3. Mamdani E.H. and Assilian S. An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller // Int. J. Man-Mach. Stud. – 1975. – Vol. 7. – P. 1–13.

NONLINEAR CONTROL METHODS FOR INCREASING ASYNCHRONOUS ELECTRIC DRIVE ENERGY EFFICIENCY

B.P. SMOLYAKOV, A.A. SHIGAPOV

FSBEI HPE «Kazan power-engineering university», Kazan

Annotation. We considered a modified system for a direct control of induction motor torque using a neural network unit for identification of electrical drive parameters. A number of disadvantages for the standard torque control system were identified. We described neural network element synthesis, in order to modify the system and overcome these disadvantages. Our modeling results for the modified system with neural network and neural-fuzzy components are presented.

Keywords: Direct torque control, neural networks, fuzzy logic.

УДК 532.575.3

ОЦЕНКА НИЖНЕЙ ГРАНИЦЫ АВТОМОДЕЛЬНОГО РЕЖИМА ТЕЧЕНИЯ ЖИДКОСТИ В ИЗМЕРИТЕЛЬНОМ СУЖАЮЩЕМ УСТРОЙСТВЕ

С.Н. ЗАГОСКИН*, О.М. СОКОВНИН*

*Общество с ограниченной ответственностью «ОЛНИ», г. Киров

**ФГБОУ ВПО «Вятский государственный университет», г. Киров

Аннотация. Сделан анализ действующей нормативно-технической документации, регламентирующей измерение расхода жидкостей с помощью сужающих устройств. Экспериментально исследована зависимость коэффициента расхода стандартного измерительного сопла от режима течения жидкости. Установлена нижняя граница автомодельности указанного коэффициента от числа Рейнольдса. Результаты работы могут быть использованы для совершенствования систем измерения и учета водопотребления предприятий ТЭК.

Ключевые слова: коэффициенты истечения и расхода, измерительное сопло, ресурсосбережение.

Производство тепловой и электрической энергии требует больших количеств исходной природной воды, учет и рациональное использование которой неразрывно связаны с точным измерением ее действительного расхода. Применение сужающих устройств – сопел и диафрагм – является одним из основных методов определения расхода воды на предприятиях теплоэнергетики.

Согласно действующим нормативам для сопел объемный расход среды q_v определяется по формуле [1]

$$q_v = \left(\pi d^2 / 4 \right) K_{ш} C E \varepsilon (2 \Delta p / \rho)^{0,5}, \quad (1)$$

где d , Δp – диаметр выходного сечения сопла и перепад давления на нем; ρ – плотность среды; $K_{ш}$ – поправочный коэффициент, учитывающий шероховатость внутренней поверхности измерительного трубопровода; C , E – коэффициенты истечения и скорости входа; ε – коэффициент расширения, учитывающий уменьшение плотности газа из-за снижения его статического давления после сопла (для жидкости $\varepsilon = 1$).

Коэффициент скорости входа E в формуле (1) представляет собой долю кинетической энергии потока на входе в сопло, преобразуемую в выходящую из сопла кинетическую энергию струи [2]. Величина E рассчитывается из выражения [3]

$$E = 1/\sqrt{1-\beta^4}, \quad (2)$$

где $\beta = d/D$ – отношение выходного (d) и входного (D) диаметров сопла.

Коэффициент истечения C в формуле (1) представляет собой отношение действительного и теоретического значений расхода жидкости [3]. Величина C для стандартных измерительных сопел (ИСА 1932, эллипсное, Вентури) определяется по эмпирическим формулам [1]. В частности, для сопла ИСА 1932 стандартом предписывается использовать следующую формулу

$$C = 0,99 - 0,2262\beta^{4,1} - (0,00175\beta^2 - 0,0033\beta^{4,15}) \cdot (10^6 / Re)^{1,15}. \quad (3)$$

Произведение коэффициентов $C \cdot E$ называется коэффициентом расхода μ .

Границы применения приведенных расчетных соотношений

$$0,3 \leq \beta \leq 0,8, \quad (4)$$

$$7 \cdot 10^4 \leq Re \leq 10^7 \text{ при } 0,3 \leq \beta < 0,44$$

$$\text{и } 2 \cdot 10^4 \leq Re \leq 10^7 \text{ при } 0,44 \leq \beta \leq 0,8. \quad (5)$$

Анализ формулы (3) показывает, что коэффициент истечения сопла (а следовательно, и коэффициент расхода) зависят от числа Рейнольдса, т.е. от значения расхода среды, поэтому уравнение (1) является неявным. Его решение, согласно [3], находится методом итераций, что увеличивает количество измерений и в целом достаточно трудоемко. В связи с этим представляет практический интерес оценка относительной погрешности $(1 - C/C_0)$ расчетной величины коэффициента истечения, возникающей в случае неучета слагаемых, зависящих от числа Рейнольдса. На рис. 1 представлены зависимости $(1 - C/C_0)$ при изменении параметров β и Re в пределах, определенных формулами (4) и (5).

Как видно из рис.1, при $Re > 2 \cdot 10^5$ его вклад в относительную погрешность определения расчетной величины коэффициента истечения

не превышает 0,2 %. То есть с достаточной для практики точностью можно считать, что при $Re > 2 \cdot 10^5$ значения коэффициента истечения и прямо пропорционального ему коэффициента расхода становятся автомодельными по отношению к числу Рейнольдса.

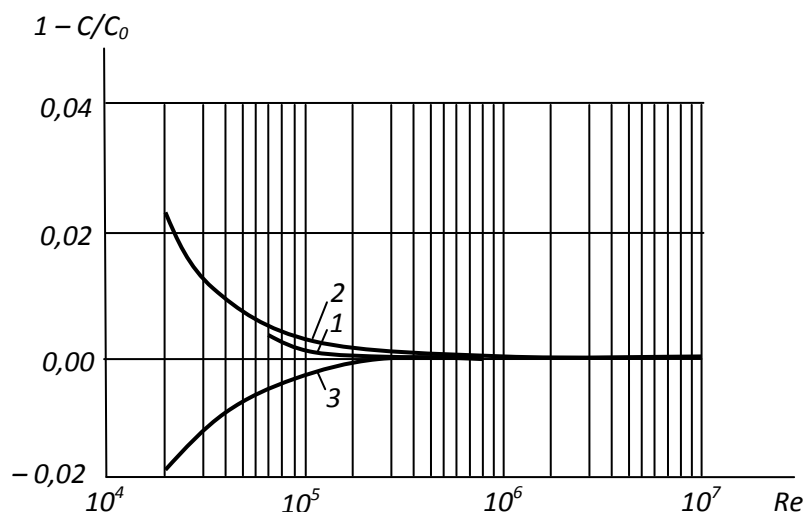


Рис. 1. Относительная погрешность расчетной величины коэффициента истечения без учета слагаемых, зависящих от числа Рейнольдса:
 $\beta = 0,3$ (1); $0,5$ (2); $0,8$ (3)

Для определения параметров начала автомодельного режима течения в сужающем устройстве экспериментально исследована зависимость коэффициента расхода стандартного измерительного сопла от режима течения жидкости.

Сопло ИСА 1932 ($d = 20$ мм, $\beta = 0,50$) устанавливалось в напорном трубопроводе центробежного насоса. Материал трубопровода – труба стальная холоднотянутая, для которой значение поправочного коэффициента шероховатости $K_{ш}$, рассчитанное по методике [1], составило 1,003. Для измерения перепада давления на сопле Δp производился отбор статических давлений до и после сопла через отдельные отверстия во фланцах [3], класс точности используемых манометров – 1,0. Расход воды q_v через сопло определялся с помощью крыльчатого одноструйного водосчетчика типа УВК-40, погрешность измерений которого не более 2 %. При температуре измерений 20°C плотность воды ρ принималась равной $998,2$ кг/м³, коэффициент кинематической вязкости $\nu = 1,004 \cdot 10^{-6}$ м²/с. Коэффициент расхода сопла

μ (произведение $C \cdot E$) определялся из формулы (1), значения числа Рейнольдса рассчитывались по выражению

$$Re = 4q_v / \pi Dv. \quad (6)$$

Полученные величины коэффициента расхода μ при различных значениях числа Re приведены на рис. 2.

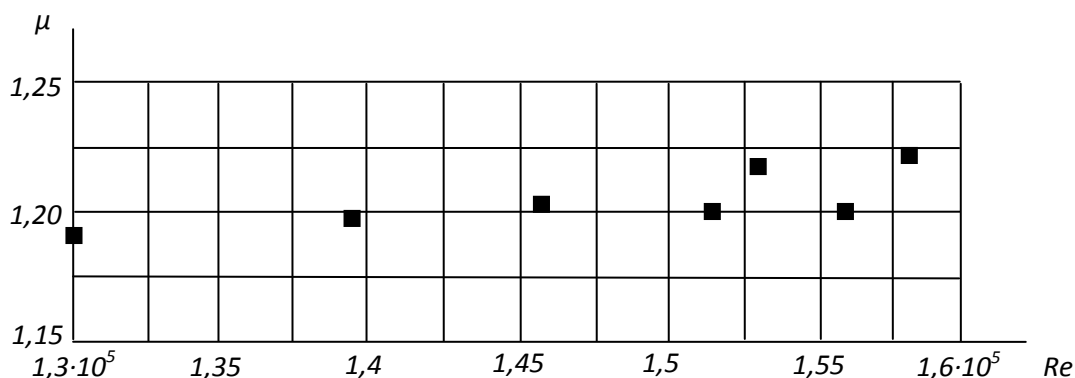


Рис. 2. Значения коэффициента расхода сопла в зависимости от числа Рейнольдса

Как следует из рис. 2, при значениях числа Рейнольдса $(1,3-1,6) \cdot 10^5$ коэффициент расхода μ составил 1,19–1,22, т.е. изменялся в пределах менее 3%. Это сопоставимо с суммарной относительной погрешностью используемых приборов измерения расхода и давления жидкости. То есть можно считать, что наблюдаемый разброс значений коэффициента расхода сопла обусловлен, в первую очередь, погрешностью измерительных приборов, и наличие автомодельности коэффициента расхода измерительного сопла от числа Рейнольдса имеет место при значениях последнего больше $1,3 \cdot 10^5$.

Отметим, что исследуемое в лабораторных условиях сопло устанавливалось в трубопроводе достаточно малого диаметра, находящегося на нижней границе допустимых по нормативным документам размеров. Очевидно, с увеличением диаметра трубопровода и повышением класса точности используемых средств измерений точность получаемых результатов будет возрастать. Для предприятий теплоэнергетики, где основные потоки воды транспортируются по трубопроводам достаточно большого диаметра (200–400 мм и более), автомодельность работы измерительных сопел и диафрагм по отношению к режиму течения жидкости обеспечивается практически всегда.

В целом использование сужающих устройств с постоянным коэффициентом расхода исключает итерационную процедуру определения расхода жидкости, что существенно снижает время измерений и улучшает контроль водопотребления. С учетом объема потребления и количества производимых измерений расхода воды на предприятиях теплоэнергетики уменьшение времени единичных измерений при сохранении требуемой степени точности позволит более рационально использовать важнейший природный ресурс, каким является вода.

Список литературы

1. ГОСТ 8.586.3-2005 (ИСО 5167-3:2003). Измерение расхода и количества жидкостей и газов с помощью стандартных сужающих устройств. Часть 3. Сопла и сопла Вентури. Технические требования. – М.: Стандартиформ, 2007. – 37 с.
2. Кремлевский П.П. Расходомеры и счетчики количества. Справочник. – Л.: Машиностроение, 1989. – 701 с.
3. ГОСТ 8.586.1-2005 (ИСО 5167-1:2003). Измерение расхода и количества жидкостей и газов с помощью стандартных сужающих устройств. Часть 1. Принцип метода измерений и общие требования. – М.: Стандартиформ, 2007. – 55 с.

ESTIMATION OF THE LOWER BOUND OF AUTOMODEL LIQUID FLOW REGIME IN MEASURING ORIFICE INSTRUMENTS

S.N. ZAGOSKIN*, O.M. SOKOVNIN*

*Limited Liability Company «OLNI», Kirov

**Vyatka State University, Kirov

Annotation. The analysis of actual standard and technical documentation that regulate measurement of liquids flow rate by means of orifice instruments is performed. The dependence of the flow coefficient of the orifice instrument on the liquid flow regime is investigated experimentally. The lower bound of automodel regime of this coefficient on the Reynolds number is determined. The results can be used to improve the measuring and accounting systems of water consumption in the energy industry.

Keywords: flow and efflux coefficients, metering nozzle, resource-saving technology.

УДК 662.997

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПАССИВНОЙ СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ СООРУЖЕНИЙ

Ж.Д. САДЫКОВ, А.А. МАНСУРОВ, Ю.С. ТИЛАВОВ,
Н.К. ДАМАЕВ, К.Х. УРАКОВ, О.Х. ЭШКОБИЛОВ

«Каршинский государственный университет», г. Карши, Узбекистан

Аннотация. Рассмотрена конструкция пассивной системы солнечного теплоснабжения для сельскохозяйственных сооружений, позволяющая уменьшить тепловые потери через зачерненной поверхности стенки при фильтрации воздуха и увеличения эффективной теплопроводности стенки. Предложены способы и мероприятия по энергосбережению в зданиях и сооружениях.

Ключевые слова: Солнечная энергия, пассивная солнечная система, солнечный коллектор.

Солнечная энергия – это практически неиссякаемый, неистощимый и экологически чистый источник энергии. Использование солнечной энергии в системах теплоснабжения современных зданий и сооружений – является перспективное направление в теплоэнергетике.

Сегодняшние солнечные системы уже рентабельны, надежны и просты в эксплуатации. Их использование набирает популярность в развитых странах. Это становится не только экономно, но и престижно.

Одним из потребителем топливно-энергетических ресурсов является сельское хозяйство, причем значительная их часть используется для получения теплоты, которая расходуется на отопление, вентиляцию и горячее водоснабжение производственных, жилых и общественных зданий, создания искусственного микроклимата в сельскохозяйственных сооружениях (животноводческих и птицеводческих помещениях). Существенная доля энергозатрат приходится на поддержание оптимальных параметров микроклимата на сельскохозяйственных сооружениях, что способствует повышению продуктивности. В каждом обогреваемом сельскохозяйственных сооружений необходимо создавать и поддерживать тепловой режим в зависимости от его назначения и предъявляемых санитарно-гигиенических требований. Тепловым режимом сооружения называют его общее тепловое состояние в течение

отопительного сезона, рассматриваемое как совокупность тепловых условий в помещениях. Тепловые условия в помещениях создаются при взаимодействии поверхностей нагретых и охлажденных ограждений, материалов, масс нагретого и холодного воздуха.

В современных сельскохозяйственных сооружениях для отопления применяют печное, газовое и электрическое отопление. Самое распространенным видом отопления является водяное отопление. В некоторых местах по климатическим зонам и с учетом продолжительности отопительного сезона в сельскохозяйственных сооружениях предпочтение отдают воздушному отоплению, совмещенному с приточной вентиляцией. Для водяных и паровых caloriferов сооружают котельные, что не всегда экономически выгодно.

В основе многих солнечных энергетических систем лежит применение солнечных коллекторов. Коллектор поглощает световую энергию Солнца и преобразует ее в тепло, которое передается теплоносителю и затем используется для обогрева зданий, нагрева воды и т.п. Солнечные коллекторы могут применяться практически во всех процессах, использующих тепло.

Солнечный коллектор теряет тепло различными способами. Коэффициент потерь через прозрачную изоляцию зависит от температуры поглощающей пластины (поверхности коллектора), числа и материала прозрачных покрытий, температуры окружающей среды и скорости ветра.

Нанесение на теплоприемную (лучепоглощающую) поверхность солнечного коллектора поглощающих селективных покрытий, обладающих высокой поглощательной способностью солнечного излучения и низкой степенью черноты в спектральной области собственного излучения поверхности при рабочей температуре, является одним из действенных способов повышения эффективности коллектора.

В мировой практике научные и конструкторские работы преимущественно ведутся в направлении разработки и создании пассивных систем солнечного отопления, отличающиеся от активных систем своей простотой и дешевизной. Простота конструктивных решений пассивных систем солнечного отопления не требуют больших дополнительных капитальных, эксплуатационных и ремонтных затрат. Пассивные солнечные здания и сооружения – это те, проект которых разработан с максимальным учетом местных климатических условий, и где применяются соответствующие технологии и материалы для обогрева, вентиляции, охлаждения и освещения здания за счет энергии Солнца. К ним относятся традиционные строительные технологии и материалы,

такие как изоляция, массивные полы, обращенные к югу окна. Такие помещения могут быть построены в некоторых случаях без дополнительных затрат. В других случаях возникшие при строительстве дополнительные расходы могут быть скомпенсированы снижением энергозатрат.

Пассивные солнечные здания являются экологически чистыми, они способствуют созданию энергетической независимости и энергетически сбалансированному будущему.

В пассивных системах роль солнечного коллектора и аккумулятора теплоты обычно выполняют сами ограждающие конструкции здания, а движение теплоносителя (воздуха) осуществляется за счет естественной конвекции без применения вентилятора. Отсутствие расходов на оборудование и незначительное удорожание здания с пассивной системой солнечного отопления по сравнению с обычным зданием делает эти системы весьма перспективными и конкурентоспособными. Поэтому в ряде стран интенсивно развивается направление, связанное с применением так называемых пассивных систем солнечного отопления.

Пассивные системы солнечного отопления основаны на сборе энергии солнечного излучения на зачерненных поверхностях, защищенных прозрачным покрытием, их нагрев с последующей передачей тепла теплопроводностью и свободной конвекцией в обогреваемое помещение. Преимущество системы с коллекторно-аккумулирующей стенкой по сравнению с системой прямого обогрева через остекленные проемы – это наиболее рационально организованное поступление тепла в обогреваемое помещение, которое позволяет уменьшить потери тепла за счет уменьшения сбросового тепла из-за перегрева внутри помещения и максимального поступления его в помещение в наиболее холодное время суток.

Главное преимущество пассивных систем солнечного отопления с коллекторно-аккумулирующей стенкой – это наиболее выгодное распределение поступления энергии во времени, уменьшение возможности перегрева и связанным с ним дополнительным потерь тепла. С помощью конструктивных решений можно уменьшить потери тепла от коллекторно-аккумулирующей стенки и тем увеличить эффективность системы.

Эффективность пассивных систем основывается на их сравнительно низкой стоимости, возможности использовать как прямую, так и рассеянную солнечную радиацию, приток которой в зимнее месяцы на горизонтальную поверхность может составлять более половины от суммарной. Из этого следует, что эффективность пассивной системы удобно определять отношением тепла поступающего от солнца к общей

величине тепла необходимого для создания комфортных условий в помещении или к отопительной нагрузке.

Одним из наиболее часто встречающихся недостатков конструкции коллекторно-аккумулирующей стенки в проектируемых сооружениях с солнечным теплоснабжением является использование стенки малой аккумулирующей способности при большом ее термическом сопротивлении. Следствием этого становится значительное повышение температуры наружной поверхности стенки, ведущее к увеличению тепловых потерь через остекление [1–3, 6–8].

Методика расчета и теоретические исследования пассивных систем весьма сложны, что затрудняет обоснованное проектирование сооружений с такими системами. В ряде работ отечественных и зарубежных авторов предлагались математические модели с разной степенью приближения для определения текущих значений искомых параметров. Эти модели весьма сложны и громоздки, так как должны учитывать изменяющиеся внешние условия, теплоусвоение сооружения и условия его теплообмена с внешней средой, теплообмен внутри помещений, условия облучения коллекторно-аккумулирующей стенки и т.п.

В связи с этим практически интерес приобретает задача создания простых аппроксимационных методов расчета интегральных характеристик систем пассивного солнечного отопления сооружений за отопительный сезон в целом, например, такой характеристики, как коэффициент замещения отопительной нагрузки, который определяет как технические, так и экономические показатели таких систем. Коэффициент замещения отопительной нагрузки является сложной функцией, как метеорологических условий в месте постройки здания, так и архитектурно-планировочных и конструктивных особенностей постройки пассивной системы солнечного отопления. Если рассматривать влияние на систему изменения толщины и теплопроводности коллекторно-аккумулирующей стенки, то следуя электротепловой аналогии и учитывая, что принятая методика относится к квазистационарному приближению с использованием величин осредненных за месяц, количество тепла, прошедшее через коллекторно-аккумулирующей стенки, можно определить посредством простого уравнения теплового баланса.

Для сплошной однородной стенки при отсутствии циркуляции воздуха оно будет иметь вид:

$$Q = [\alpha_2(T_3 - T_2) + \alpha_1(T_3 - T_1)]\Delta\tau \quad (1)$$

где: Q – тепло поглощенное наружной поверхностью коллекторно-аккумуляторной стенки, осредненное за длительный промежуток времени, в течение времени $\Delta\tau$; T_1 – температура окружающей среды (осредненные значения); T_2 – температура внутри помещения; T_3 – температура наружной поверхности коллекторно-аккумуляторной стенки. α_Σ и α_1 – соответственно суммарные коэффициенты теплопередачи от наружной поверхности коллекторно-аккумуляторной стенке в помещение и к внешней среде.

$$\alpha_\Sigma = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_2} + \frac{\delta}{\lambda}}, \quad (2)$$

где α_2 – коэффициент теплопередачи от внутренней поверхности коллекторно-аккумуляторной стенки к воздуху в помещении; δ, λ – толщина и коэффициент теплопроводности стенки.

Из уравнений (2) следует, что эффективность стенки будет возрастать при увеличении α_Σ , уменьшении α_1 и T_3 . α_Σ будет увеличиваться с увеличением α_2 и при уменьшении $\frac{\delta}{\lambda}$. На основе этого провели анализ эффективности отопления сооружений с коллекторно-аккумуляторной стенкой из материала с различной теплопроводностью, но с одинаковой плотностью и теплоемкостью. В этом случае для соблюдения подобия или условия одинакового запаздывания тепловой волны, чтобы максимум повышения температуры внутренней поверхности коллекторно-аккумуляторной стенке приходился на определенное время суток, необходимо соблюдать равенство безразмерного времени или критерия Фурье. Это требование относится к долгосрочным осредненным значениям при изменении температуры в стенке в течение суток.

В табл. 1 представлены расчетные результаты температур по толщине стенки при различных расходах воздуха, выполненные на основе [4, 5].

По данным таблицы расчетные данные соответствуют с экспериментальными значениями, за исключением точек, приближающихся к тепловоспринимающей поверхности, где температурные поля еще не выровнялись ввиду дискретности тепловых стоков к воздушным струйкам. Температура тепловоспринимающей поверхности изменяется быстро по мере увлечения расхода воздуха, а внутренней поверхности – незначительно, что объясняется, в частности, ростом

коэффициента теплоотдачи при повышении скорости потока воздуха вдоль этой поверхности.

Таблица 1

Расчетная температура по толщине стенки
при различных расходах воздуха

| № | Расход воздуха $\frac{\text{кг}}{\text{м}^2 \cdot \text{час}}$ | Температура воздуха $t, ^\circ\text{C}$ | Расположение термопары (мм): | | | | | |
|---|---|--|--|---------|---------|----------|---------|---------|
| | | | Расчетная температура по толщине стенки ($t, ^\circ\text{C}$). | | | | | |
| | | | 4,25 мм | 11,7 мм | 18,8 мм | 26,25 мм | 34,4 мм | 41,6 мм |
| 1 | 103,5 | 23,8 | 101,6 | 92,8 | 84,5 | 75,5 | 60,7 | 45,2 |
| 2 | 148,0 | 22,8 | 88,1 | 80,1 | 75,2 | 68,0 | 56,0 | 42,7 |
| 3 | 186,5 | 22,5 | 79,3 | 69,4 | 66,8 | 63,5 | 53,6 | 41,3 |

В заключение можно сделать вывод, что, оказывается, выгодно использовать для коллекторно-аккумулирующей стенки более теплопроводный материал. В этом случае уменьшается внешний коэффициент теплопередачи и средняя температура наружной поверхности стенки, что снижает потери в окружающую среду.

Вентиляция позволяет поддерживать оптимальный уровень комфорта и влажности в помещении. К тому же традиционный способ вентиляции приводит к значительному увеличению потерь тепла. Для сокращения потребления энергии, расходуемой на отопление и вентиляции, необходимо целенаправленно расширять проектирование и возведение сельскохозяйственных сооружений не только с качественной тепловой изоляцией строительных конструкций, но и системами пассивного солнечного отопления с коллекторно-аккумулирующей стенкой.

Таким образом, на сегодняшний день данная технология является наиболее эффективной технологией использования солнечной энергии в теплоснабжении зданий и сооружений на большей части России.

Итак, мы рассмотрели один из вопросов использования солнечной энергии для использования в системах теплоснабжения зданий и сооружений.

В перспективе обогрев сельскохозяйственных сооружений органическое топливо может быть заменено нетрадиционными возобновляемыми источниками энергии.

Список литературы

1. Авезов Р.Р., Орлов А.Ю. Солнечные системы отопления и горячего водоснабжения. – Ташкент: Фан. 1988. – 288 с.
2. Авезова Н.Р., Садыков Ж.Д. // Гелиотехника. – 2012. – № 1. – С. 47–53.
3. Андерсон Б. Солнечная энергия (основы строительного проектирования). – М.: Стройиздат, 1982. – 376 с.
4. Васильев Л.Л., Фрайман Ю.Е. Теплофизические свойства плохих проводников тепла. – Минск: Наука и техника, 1967. – 176 с.
5. Даффи Дж.А., Бекман У.А. Тепловые процессы с использованием солнечной энергии. – М.: Мир, 1977. – 420 с.
6. Садыков Ж.Д., Ким В.Д., Садыков Ж.Ж. // Гелиотехника. – 2003. – № 3. – С. 57–61.
7. Чакалев К.Н, Садыков Ж.Д. // Гелиотехника. – 1992. – № 4. – С. 54–56.
8. Чакалев К.Н, Садыков Ж.Д. // Гелиотехника. – 1994. – № 1. – С. 53–56.

USE THE PASSIVE SOLAR SYSTEM FOR HEATPROVISION AGRICULTURAL BUILDINGS

ZH.D. SADYKOV, A.A. MANSUROV, YU.S. TILAVOV,
N.K. DAMAEV, K.H. URAKOV, O.H. ESHKOBILOV
«Karshinskiy state university», g. Karshi, Uzbekistan

Annotation. The Considered design of the passive system solar heatprovision for agricultural buildings, allowing reduce the heat losses through blackenning surfaces of the wall when filtering the air and increase efficient heatconductivity walls. The Offered ways and actions on energy saving in building and buildings.

Key letters: Solar energy, passive solar system, solar collector.

УДК 621.311

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ УСТАНОВОК НА БАЗЕ ДВС С ВОЗДУШНЫМ ОХЛАЖДЕНИЕМ И КОГЕНЕРАЦИЕЙ

Д.С. СИНЕЛЬНИКОВ*, П.А. ЩИННИКОВ

*ФГБОУ ВПО «Новосибирский государственный
технический университет», г. Новосибирск

Аннотация. В статье рассмотрены возможности работы генераторов электрического тока на базе двигателей внутреннего сгорания (ДВС) с воздушным охлаждением в условиях когенерации, когда с отпуском электроэнергии обеспечивают отпуск теплоты. Такие установки, как правило, выполняются на основе карбюраторных двигателей внутреннего сгорания (то есть в качестве топлива используют бензин), могут применяться в быту профессиональными строителями, геологами, военными и спасателями в зоне чрезвычайных ситуаций, на территориях с отсутствием инфраструктуры. Предложены основные положения методики оценки технико-экономической эффективности когенерационных установок на базе ДВС с воздушным охлаждением.

Ключевые слова: микро-ТЭС, когенерация, двигатель внутреннего сгорания, воздушное охлаждение, методика, коэффициент полезного действия.

Повышение эффективности топливо-использующих энергетических установок на базе ДВС актуальная задача [1]. Вариантами повышения эффективности энергетических установок на базе ДВС являются: обеспечение когенерации [2–5], когда от ТЭУ (теплоэнергетической установки) отпускаются потребителю электроэнергия и теплота от контура охлаждения ДВС; и тригенерации [6], когда в дополнение к указанным, установка генерирует холод. В основе этих установок лежит работа ДВС с водяным контуром охлаждения [7]. Вместе с тем на рынке широко представлен ряд микро-ТЭС (или бензогенераторов) на основе ДВС с воздушным охлаждением. Такие установки применяются в быту, профессиональными строителями, геологами, военными и спасателями в зоне чрезвычайных ситуаций, на территориях с отсутствием инфраструктуры. Авторами показано, что применение когенерации для

таких микро-ТЭС увеличивают коэффициент использования теплоты топлива в 1,5–2 раза [8]. При этом установка мощностью в 2 кВт за 30–35 минут способна повысить температуру воздуха в помещении объемом 150 м^3 на $\approx 3^\circ\text{C}$.

1. Установка

В статье предлагается методика технико-экономической оценки микро-ТЭС с когенерацией на базе ДВС с воздушным охлаждением (рис. 1).

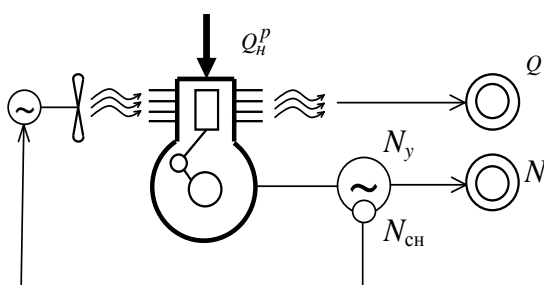


Рис. 1. Принципиальная схема микро-ТЭС с когенерацией на базе ДВС с воздушным охлаждением: Q_n^p – теплота, подведенная с топливом; N , Q – электроэнергия и теплота, отпущенные потребителю; N_y – установленная мощность ТЭУ. $N_{сн}$ – мощность собственных нужд

Установка работает следующим образом (рис. 1). Микро-ТЭС мощностью N_y за счет потребления теплоты топлива Q_n^p обеспечивает отпуск электроэнергии N потребителю. Охлаждение ДВС обеспечивает работа вентилятора за счет потребления собственных нужд $N_{сн}$, а охлаждающий ДВС воздух направляется потребителю и обеспечивает тепловую нагрузку Q .

Экспериментами, которые проводились на кафедре ТЭС НГТУ [9, 10], подтверждено, что удельный расход топлива для микро-ТЭС мощностью 2 кВт и выше находится на уровне ~ 500 г.у.т./кВт · ч (при плотности бензина 750 кг/м^3), а характеристики работы микро-ТЭС мощностью 2,4 кВт на базе ДВС «Hitachi» в зависимости от режима работы показывают, что абсолютный расход топлива на номинальной нагрузке при когенерации находится на уровне ~ 700 г/час[10].

Функционально установка делится (рис. 2) на следующие части: топливоподача, бензиновая электростанция, система охлаждения двигателя, система эвакуации дымовых газов, система подогрева сетевой воды, система измерительных приборов, нагрузка и дополнительное оборудование [9].

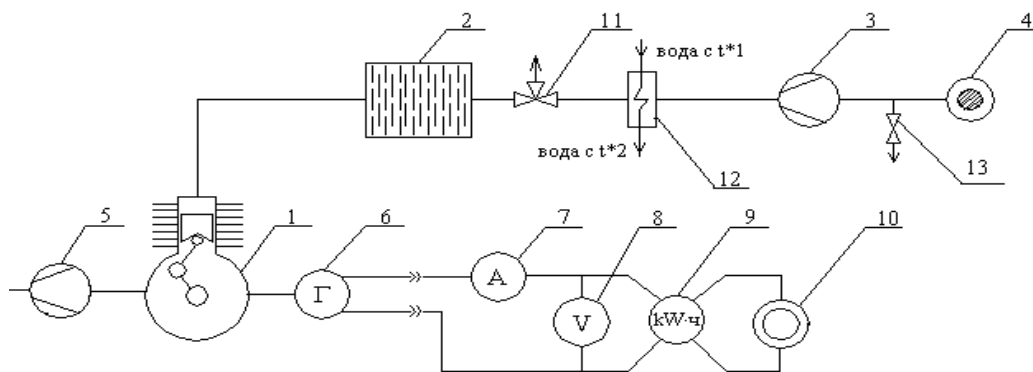


Рис. 2. Принципиальная схема лабораторного стенда «Когенерационная установка на базе ДВС»: 1 – двигатель внутреннего сгорания; 2 – глушитель; 3 – расходомер уходящих газов; 4 – дымовая труба; 5 – расходомер топлива; 6 – генератор; 7 – амперметр; 8 – вольтметр; 9 – счетчик электрической энергии; 10 – нагрузка; 11 – трехходовой кран; 12 – кожухо-трубчатый газовойодяной теплообменник; 13 – слив конденсата.

Бензиновая электростанция состоит из четырехтактного двигателя мощностью 2400 Вт, электрогенератора в защитном исполнении от механических и климатических воздействий окружающей среды, панели управления генератора (вольтметр, прерыватель цепи, терминал подключения переменного тока). Бензиновая электростанция состоит из четырехтактного двигателя мощностью 2400 Вт, электрогенератора в защитном исполнении от механических и климатических воздействий окружающей среды, панели управления генератора (вольтметр, прерыватель цепи, терминал подключения переменного тока).

Система охлаждения двигателя обеспечивает отопительную нагрузку и представляет собой вентилятор, расположенный на валу ДВС. Движение охлаждающего двигателя потока воздуха ограничено коробом, который направляет воздух в помещение объемом $\approx 150 \text{ м}^3$.

Система эвакуации дымовых газов представляет собой последовательно соединенные гофрированным газопроводом глушитель с защитным кожухом и дымовую трубу. Компонентами системы подогрева сетевой воды являются: сетевой подогреватель и расходомер воды, проходящей через него. Сетевой подогреватель представляет собой кожухо-трубчатый газовойодяной теплообменный аппарат. Нагреваемая вода проходит внутри медных трубок, а дымовые газы – в межтрубном пространстве.

2. Когенерация

Влияние отпуска теплоты (при когенерации) на эффективность η установки показано на рис. 3.

Можно видеть, что КПД – нетто по отпуску электроэнергии снижается с ростом отопительной нагрузки из-за увеличения собственных нужд на привод вентилятора, однако при этом коэффициент использования теплоты η^{II} растет до ~ 33 %.

Коэффициент использования теплоты топлива в условиях когенерации растет с ростом мощности и находится на уровне 0,47, а собственно когенерация обеспечивает повышение эффективности в ~2,5 раза (рис. 4).

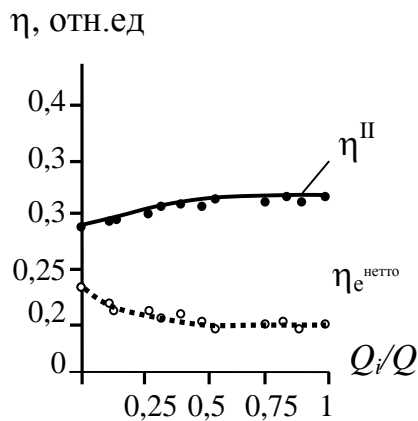


Рис. 3. Изменение эффективности ТЭУ в зависимости от отопительной нагрузки

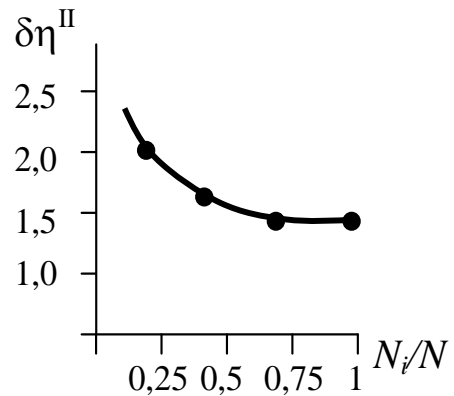


Рис. 4. Относительное увеличение коэффициента использования теплоты топлива при когенерации для ДВС с воздушным охлаждением

Приращение коэффициента использования теплоты топлива составляет при когенерации около 10, а при когенерации – 20–25 %. Относительное увеличение эффекта от когенерации составляет 50–150 % в зависимости от нагрузки (меньшие значения для больших нагрузок) (рис. 4).

Следует отметить, что микро-ТЭС на базе ДВС с когенерацией (рис. 5) вытесняет установку по отпуску теплоты в виде тепловой пушки. Тепловые пушки, в свою очередь, в качестве первичного ресурса могут потреблять органическое топливо для производства теплоты и электроэнергию на привод вентилятора, либо только электроэнергию для того и другого (рис. 5). В обоих случаях обеспечение теплотой потребует наличие бензогенератора.

Тогда экономический эффект следует определять в условиях приведения вариантов к сопоставимому виду по отпуску продукции. В этом случае уравнения энергобаланса будут иметь вид (для случаев рис. 5):

$$a: Q = B \cdot Q_H^P, \tag{1}$$

$$б: Q = N - N_{CH}, \tag{2}$$

В этих выражениях: B , Q_H^P – расход и низшая теплота сгорания топлива тепловой пушки на органическом топливе; N – подведенная электроэнергия к электрической тепловой пушке, N_{CH} – мощность вентилятора.

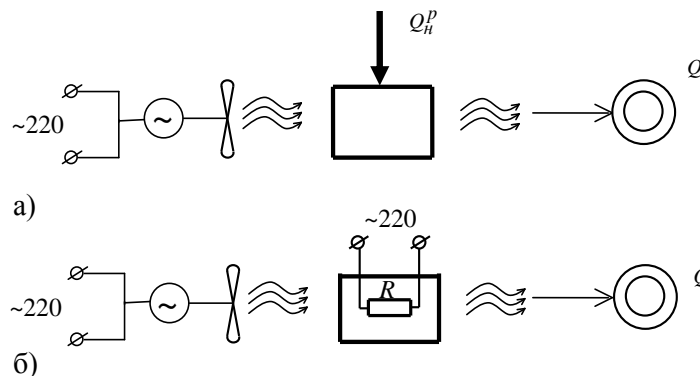


Рис. 5. Принципиальная схема тепловых пушек:
а) на органическом топливе; б) с электронагревателем (R)

Технико-экономический эффект при сравнении вариантов, возможно определить через затратный механизм (такой механизм успешно применяется в современных исследованиях во многих случаях [11–13]). В данном случае (рис. 6), учитывают затраты на топливо z_1 и z_4 при генерации двух видов продукции, затраты (капиталовложения) на бензогенератор z_2 и в тепловую пушку z_3 .

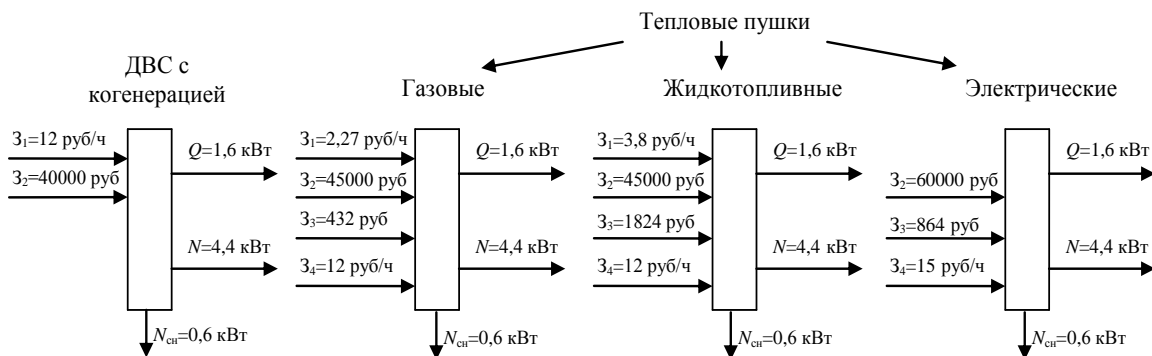


Рис. 6. К определению технико-экономического эффекта разных вариантов энергосбережения

В этом случае экономический эффект определяется как разность в сумме затрат между вариантами:

$$\Delta Z = \sum_i Z_i - \sum_j Z_j, \quad (3)$$

где i, j – слагаемые затрат сравниваемых вариантов.

В свою очередь, составляющие затрат определяют по следующим выражениям:

$$Z_1 = C_T \cdot B_1, \quad (4)$$

$$Z_2 = k_y^N \cdot N_y, \quad (5)$$

$$Z_3 = k_y^Q \cdot N_Q, \quad (6)$$

$$Z_4 = C_T \cdot B_4. \quad (7)$$

В этих выражениях C_T – цена топлива, B_1 – расход топлива основной установкой (микро-ТЭС или тепловой пушкой); B_4 – расход топлива замещающим бензогенератором; k_y^N, k_y^Q – удельные капиталовложения в микро-ТЭС и тепловую пушку соответственно; N_y, N_Q – установленные мощности микро-ТЭС и тепловой пушки соответственно.

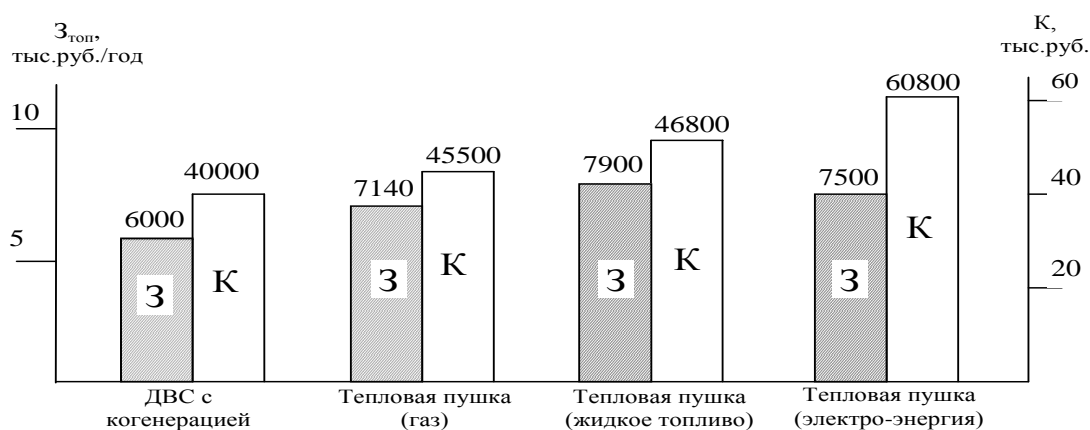


Рис. 7. Переменная и капитальная составляющие эффекта от применения ДВС с воздушным охлаждением и когенерацией по сравнению с тепловыми пушками: З – затраты на топливо; К – капиталовложения

Эффект от применения когенерации для условий (см. рис. 6) при стоимости бензина 30 руб./л, газа 18 руб./л, различных цен на оборудование и при 500 часов работы в году (например, 1,5–2 месяца работы строительной бригады на объекте) представлен на рис. 7. Несложные расчеты показывают, что при увеличении числа часов работы в два раза и повышении коэффициента использования топлива до $\approx 0,5$,

либо при том же числе часов использования, но при увеличении коэффициента использования топлива до $\approx 0,9$ экономический эффект (Э) может составить около 40 тыс.руб. при сроке службы 4 года. Это означает, что, при сложившейся конъюнктуре цен на топливо и розничных ценах на оборудование, за счет экономии можно каждые четыре года полностью обновлять установку, даже при ее работе 3–4 месяца в году.

Выводы

1. В статье представлены основные положения методики оценки технико-экономической эффективности когенерационных установок на базе ДВС с воздушным охлаждением, в основе которой лежит затратный механизм и приведение вариантов к сопоставимому виду по энергетическому эффекту.

2. Показано, что микро-ТЭС с когенерацией эффективнее по сравнению с бензогенератором и тепловой пушкой и за счет экономии может обновляться каждые четыре года.

Список литературы

1. Кожуховский И.С., Новоселова О.А. Роль и перспективы деятельности технологической платформы «Малая распределенная энергетика» в развитии распределенной энергетики // Круглый стол ТП «Малая распределенная энергетика». Российское энергетическое агенство, 2013. – 23 с.

2. Судавный А.С. Развитие когенерации в контексте концепции интеллектуального распределения // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – Тула: ТулГУ. – № 8. – 2014. – С. 117–120.

3. Ахтулова Л.Н., Ахтулов А.Л., Леонов Е.Н., Петухова Н.Н., Смирнов С.И. Интеграционные технологии при создании малых электротехнических систем и комплексов на основе методологии когенерации // Омский научный вестник. – Омск: ОмГТУ. – № 2 (130). – 2014. – С. 145–150.

4. Денисов-Винский Н.Д. Мини-ТЭЦ как надежное средство решения проблемы энергообеспечения // Энергобезопасность и энергосбережение. – № 2. – 2007. – С. 10–18.

5. Филлипов С.П. Малая энергетика в России // Теплоэнергетика. – М.: МЭИ. – № 8. – 2009. – С. 38–44.

6. Тонкошкур А.Г., Муслимов Е.И. Обоснование принципов тригенерации на основе комбинирования ГТУ с АБХМ // Проблемы теплоэнергетики. – № 3. – Саратов: СГТУ, 2014. – С. 203–206.

7. Ноздренко Г.В., Шаров Ю.И., Бородихин И.В. Тепловая электростанция на базе ДВС. Методические указания. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2008. – 39 с.

8. Синельников Д.С., Щинников П.А. Эффективность когенерационной теплоэнергетической установки на базе ДВС с воздушным охлаждением // Энергетика и теплотехника. Сборник научных трудов. – № 19. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2015. – С. 64–69.

9. Щинников П.А., Кутузова А.С. Теплоэнергетика. Методические указания. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2009. – 47 с.

10. Шаров Ю.И., Щинников П.А. Основы теплопередачи: сборник лабораторных работ : методические указания. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2011. – 39 с.

11. Щинников П.А., Ноздренко Г.В., Михайленко А.И., Дворцовой А.И., Сафронов А.В. Автоматизация технологических процессов на ТЭС и управление ими. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2014. – 291 с.

12. Щинников П.А., Ноздренко Г.В., Томилов В.Г. и др. Комплексные исследования ТЭС с новыми технологиями: монография. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2005. – 528 с.

13. Ноздренко Г.В., Щинников П.А., Серант Ф.А., Томилов В.Г., Зыкова Н.Г., Коваленко П.Ю., Русских Е.Е. Эксергетический анализ новых котельных технологий в составе энергоблоков ТЭС // Теплофизика и аэромеханика. – Т. 16. – № 2. – 2009. – С. 331–340.

ASSESSING METHODS THE TECHNICAL AND ECONOMIC EFFICIENCY PLANTS BASED ON COGENERATION AND AIR-COOLED INTERNAL COMBUSTION ENGINES

D.S. SINELNIKOV*, P. A SHCHINNIKOV*

*FSBEI HPE «Novosibirsk State Technical University», Novosibirsk

Annotation. The article discusses the possibility of the electric current generators on the basis of internal combustion engines (ICE) with air cooling in a cogeneration as a supply of electricity provide holiday warmth. Such installations are usually run on gasoline internal combustion engines (i.e. used as fuel gasoline) can be used in everyday life by professional builders, geologists, military and rescue workers in the emergency area and in areas with a lack infrastructure. Proposed methodology for assessing the main provisions of cogeneration plants technical and economic efficiency based ICE with air cooling.

Key letters: micro thermoelectric power station, cogeneration, internal combustion engine, air-cooled, heat gun, technique, efficiency.

УДК 621.182

К ВОПРОСУ СНИЖЕНИЯ СЕБЕСТОИМОСТИ ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ ОТ КОТЕЛЬНЫХ ЖИЛЫХ МИКРОРАЙОНОВ НА СТАДИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Р.Н. ЗАКИРОВ, Н.Д. ЧИЧИРОВА, А.А. ЧИЧИРОВ
ФГБОУ ВПО «Казанский государственный энергетический университет»,
г. Казань

Аннотация. Рассмотрены отопительные котельные жилых комплексов Республики Татарстан с различными вариантами тепловых схем и типоразмерами котлов. Определены особенности при утверждении тарифов на тепловую энергию, производимую в режиме некомбинированной выработки, в первые два года работы котельных. Выполнен анализ приведённых затрат топлива и электроэнергии на производство тепловой энергии в котельных за первый полный год работы. Определены критерии, влияющие на себестоимость тепловой энергии, которые должны быть учтены на стадии проектирования котельных жилых микрорайонов.

Ключевые слова: котельные, тепловая энергия, себестоимость, проектирование

В последние годы наметилась тенденция строительства жилых комплексов с теплоснабжением от собственных котельных.

Инвесторы заинтересованы в возврате инвестиций от строительства котельных и тепловых сетей и не торопятся передавать объекты теплоснабжения на баланс муниципального образования. В соответствии с Федеральным законом №190-ФЗ «О теплоснабжении» от 27.07.2010 г. [1] они либо создают в своей структуре теплоснабжающую организацию, либо передают котельные и тепловые сети в аренду организациям, имеющим соответствующие разрешения на эксплуатацию опасных производственных объектов.

Одним из важнейших мероприятий по повышению эффективности котельной установки является правильный выбор мощности и количества котлов для проектируемого источника теплоснабжения. Использование типовых решений при проектировании в своей основе субъективно и не гарантирует высокого качества установки и ее приемлемых потребительских свойств.

Основной характеристикой котельной установки, определяющее ее потребительские свойства, являются приведенные затраты на получение тепловой энергии (себестоимость тепловой энергии, руб./Гкал). Применение на практике методики по определению приведенных затрат на получение тепловой энергии, позволяет оценить эффективность новых разработок и целесообразность модернизации эксплуатируемых котельных [2].

Тарифы на тепловую энергию (руб./Гкал), поставляемую теплоснабжающими организациями потребителям, подлежат регулированию в органе государственного регулирования тарифов [1, ст. 8].

В соответствии с Постановлением Правительства РФ № 1075 от 22.10.2012 г. «О ценообразовании в сфере теплоснабжения» [3] первые три года в качестве метода регулирования тарифов принимается метод экономически обоснованных расходов.

Особенностью при утверждении тарифов на тепловую энергию, производимую в режиме некомбинированной выработки, в первые годы являются:

- отсутствие фактических данных годовых затрат на топливо, электроэнергию, реагенты и на общепроизводственные расходы;

- отсутствие данных по фактическим тепловым нагрузкам котельных. Жилые дома сданы в эксплуатацию и переданы в УК или ТСЖ, процесс заселения жильцами продолжительный и даже факт покупки квартиры сам по себе не является гарантией проживания собственника в квартире и потребления им горячей воды;

- работа котельной с малой загрузкой, возникающая вследствие поэтапного ввода жилья. Котел работает с минимальной нагрузкой, особенно в летний период.

Расчетная производительность котельной определяется суммой часовых расходов тепловой энергии на отопление, вентиляцию и горячее водоснабжение всего жилого комплекса с учётом расходов тепловой энергии на собственные нужды котельной и потерь её в тепловых сетях [4, п. 4.11].

Количество и единичную производительность котлов, устанавливаемых в автономной котельной, следует выбирать по расчетной производительности котельной, но не менее двух, проверяя режим работы котлов для ночного летнего периода года; при этом в случае выхода из строя наибольшего по производительности котла оставшиеся должны обеспечить отпуск теплоты на:

– технологическое теплоснабжение и системы вентиляции – в количестве, определяемом минимально допустимыми нагрузками (независимо от температуры наружного воздуха);

– отопление, вентиляцию и горячее водоснабжение – в количестве, определяемом режимом наиболее холодного месяца.

Максимальное количество котлов, устанавливаемых в котельной, определяется на основании технико-экономических расчетов. В котельных должна предусматриваться установка не менее двух котлов, за исключением производственных котельных второй категории, в которых допускается установка одного котла [4, п.4.14; 5, п. 5.5].

В таблице 1 представлены технические характеристики котельных жилых комплексов, построенных, показаны фактические нагрузки котельных в зимний и летний периоды, тепловая мощность и загрузка котла, находящегося в работе.

В работе рассмотрены отопительные котельные жилых комплексов в Республике Татарстан с различными вариантами тепловых схем и типоразмерами котлов.

Технические характеристики котельных жилых комплексов:

– котельная жилого комплекса Чистое небо. Установленная тепловая мощность составляет 9,82 Гкал/ч, в том числе два котла по 3,5 Гкал/ч, третий котел 1,8 Гкал/ч и четвёртый котел 1,02 Гкал/ч. В работе зимой находится котел с тепловой мощностью 1,8 Гкал/ч с загрузкой 92 % при фактической нагрузке 1,62 Гкал/ч, летом – 1,02 Гкал/ч с загрузкой 43 % при нагрузке 0,44 Гкал/ч;

– котельная жилого комплекса Светлая долина с установленной тепловой мощностью 19,86 Гкал/ч с тремя котлами по 6,62 Гкал/ч. В работе находится один котел, зимой с загрузкой 37 % при фактической нагрузке 2,2 Гкал/ч, летом – с загрузкой 10 % при нагрузке 0,6 Гкал/ч;

– котельная жилого комплекса Лесной городок с установленной тепловой мощностью 7,87 Гкал/ч с тремя котлами по 2,62 Гкал/ч. В работе находится один котел, зимой с загрузкой 96 % при фактической нагрузке 2,43 Гкал/ч, летом – с загрузкой 30 % при нагрузке 0,78 Гкал/ч.

Из технических характеристик видно, что летом с самой низкой 10 % загрузкой работает котел с тепловой мощностью 6,62 Гкал/ч в котельной Светлой долины.

За первый полный год работы котельных определены приведённые затраты топлива и электроэнергии на производство тепловой энергии.

На рис. 1 показана динамика приведённого потребления природного газа на полезный отпуск тепловой энергии от котельных на второй год

эксплуатации котельной. По котельной Чистого неба и Лесного городка видна относительно ровная линия. По котельной Светлой долины видно резкое увеличение приведённого потребления природного газа, что связано с работой котла с тепловой мощностью 6,62 Гкал/ч с низкой расчетной летней нагрузкой горячего водоснабжения 0,6 Гкал/ч (подключены по нагрузке ГВС всего два жилых дома из всего количества планируемых к застройке).

Отсутствие резкого увеличения в летний период по котельной Лесного городка связано с тем, что все жилые дома жилого комплекса ко второму году эксплуатации котельной уже подключены к системе теплоснабжения.

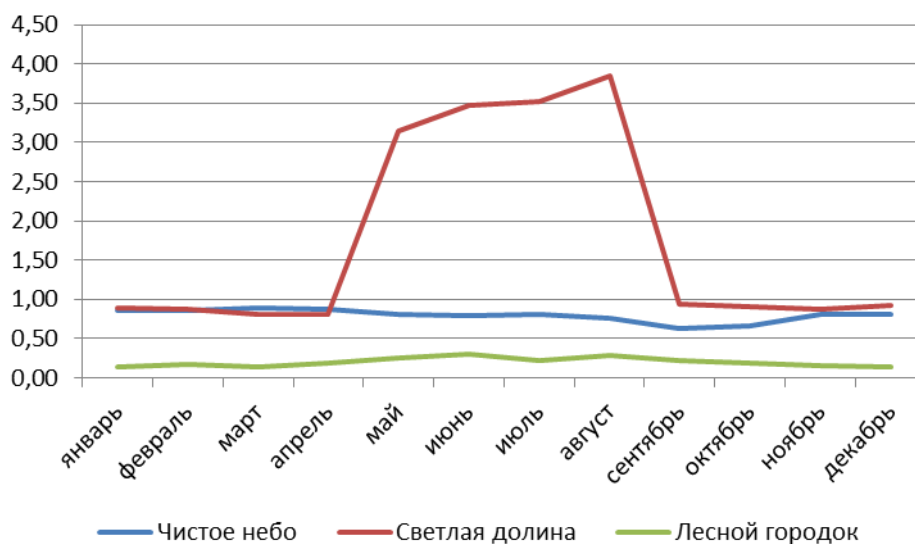


Рис. 1. Динамика приведенного потребления природного газа, тыс. м³/Гкал

На рис. 2 показана динамика приведенного потребления электроэнергии на полезный отпуск тепловой энергии от котельных на второй год эксплуатации котельной.

По котельной Чистого неба и Светлой долины видно увеличение приведенного потребления электроэнергии в летний период. В котельной Светлой долины летом в работе находится один из четырех сетевых насосов с электрической мощностью двигателя 18,5 кВт.

В котельной Чистого неба летом в работе находятся два насоса: один циркуляционный насос котлового контура с электрической мощностью двигателя 1,1 кВт и второй сетевой насос – 7,3 кВт.

Таким образом, вышеприведенные результаты расчетов свидетельствуют о том, что снижение нагрузки потребителя в летний

период приводит к росту себестоимости тепловой энергии и к убыткам теплоснабжающей организации.

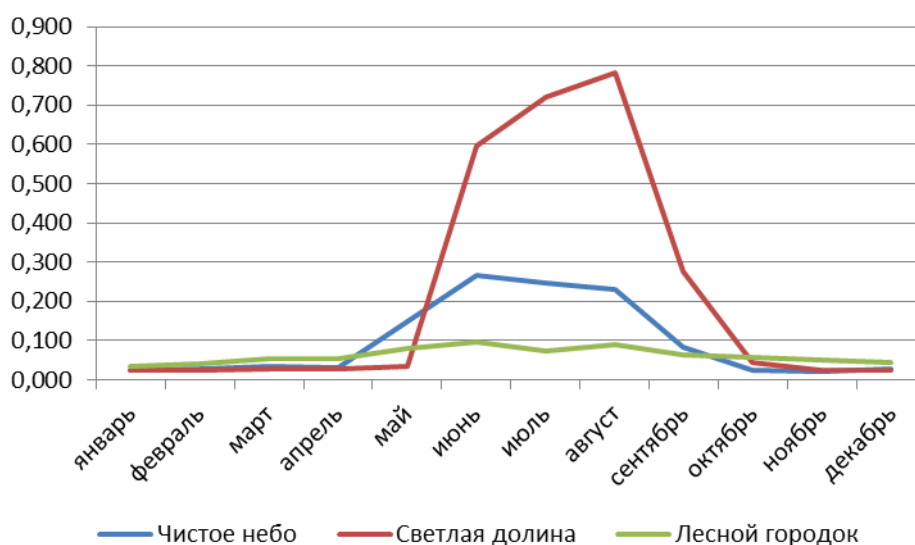


Рис. 2. Динамика приведенного потребления электроэнергии, тыс. кВт · ч/Гкал

В связи с этим во избежание роста затрат на производство тепловой энергии теплоснабжающей организации, инвесторам строительства котельных уже на стадии проектирования котельных необходимо:

- произвести анализ тепловых нагрузок потребителей по очередям ввода жилых домов микрорайона;
- правильно подобрать количество и мощность котлов с учетом их работы на летней минимальной нагрузке;
- обеспечить эксплуатацию котлов в течение года на тепловой мощности, близкой номинальному значению.

Работа выполнена в рамках реализации базовой части государственного задания Минобрнауки РФ Высшим учебным заведениям (соглашение 2014/448 от 13.03.2014, код проекта № 3029).

Список литературы

1. Федеральный закон № 190-ФЗ «О теплоснабжении» от 27.07.2010 г.
2. Сень Л.И. Оптимизация технико-экономических решений при проектировании и эксплуатации котельных установок малой мощности. – Владивосток, 2004.

3. Постановление Правительства РФ № 1075 от 22.10.2012 г. «О ценообразовании в сфере теплоснабжения».

4. Свод правил СП 89.13330.2012 Котельные. Актуализированная редакция. СНиП II-35-76 «Котельные установки».

5. Свод правил по проектированию и строительству СП 41-104-2000 Проектирование автономных источников теплоснабжения.

TO A QUESTION OF DECREASE IN PRIME COST OF THERMAL ENERGY FROM BOILER INHABITED RESIDENTIAL DISTRICTS AT A DESIGN STAGE

R.N. ZAKIROV, N.D. CHICHIROVA, A.A. CHICHIROV
FSBEI HPE «Kazan power-engineering university», Kazan

Annotation. Heating boiler rooms of housing estates of the Republic of Tatarstan with various versions of thermal schemes and standard sizes of coppers are considered. Features at the statement of tariffs for the thermal energy made in the mode of not combined development, in the first two years of work of boiler rooms are defined. The analysis of the given expenses of fuel and the electric power on production of thermal energy in boiler rooms for the first full year of work is made. The criteria influencing prime cost of thermal energy which have to be considered at a design stage of boiler inhabited residential districts are defined.

Keywords: boiler rooms, thermal energy, prime cost, design

УДК 502:504:665.6

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ СОРБЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ЛИКВИДАЦИИ РАЗЛИВОВ НЕФТЕПРОДУКТОВ

Е.С. ДРЕМИЧЕВА

ФГБОУ ВПО «Казанский государственный энергетический университет»,
г. Казань

Аннотация. В работе рассмотрен процесс сорбции нефти и нефтепродуктов на различных материалах органической природы.

Ключевые слова: разливы нефтепродуктов, сорбенты, нефтеемкость.

Среди многочисленных вредных веществ антропогенного происхождения, попадающих в окружающую среду, лидируют нефть и нефтепродукты. Нефть представляет собой сложную смесь веществ, из которых большая часть – жидкие углеводороды различного строения, а также вода, минеральные соли и др. соединения органического и минерального происхождения.

Основные источники загрязнений природных вод нефтью и нефтепродуктами – нефтедобывающие предприятия, системы перекачки и транспортировки, нефтяные терминалы и нефтебазы, хранилища нефтепродуктов и др. Особенность нефтепродуктов как примесей природных вод заключается в том, что их количество трудно прогнозировать, т.к. помимо запланированного сброса промышленных сточных вод существуют аварийные разливы.

Своевременная и эффективная очистка водных источников в зоне нефтедобычи является основной экологической задачей этих предприятий [1].

Среди методов, применяющихся для решения этой проблемы, наиболее перспективным и экологически целесообразным считается способ удаления нефти и нефтепродуктов при помощи нефтяных сорбентов.

Свидетельством практической востребованности этого метода является стремительное развитие рынка промышленных сорбентов. За последнее время ассортимент продаваемых сорбентов вырос с 25 до порядка 200 наименований. Такой широкий спектр разнообразных по природе и качеству сорбентов свидетельствует с одной стороны

о сложности адаптированного подбора сорбента, а с другой стороны позволяет производить индивидуальный его выбор в зависимости от природы удаляемых примесей, источника очищаемых вод, местных природных условий и возможностей предприятия в плане регенерации или утилизации отработанного сорбента [2].

Для оценки сорбционной способности в данной работе нами были исследованы сорбционные свойства материалов неорганической и органической природы, искусственного и природного происхождения. Оценка нефтеемкости оценивалась относительно водонефтяных эмульсий согласно ТУ-214-10942238-03-95 [3].

Эффективность в статических условиях определялась при контакте навески сорбента (20 г) с раствором модельной смеси (100 мл) через определенный интервал времени (0-20 часов).

Были выбраны органические сорбенты природные материалы и отходы производств: древесные опилки, торф, макулатура, сухая древесина. Данные виды сорбентов являются наиболее перспективными в связи с возможностью их утилизации путем сжигания.

В ходе эксперимента были использованы две модельные смеси в объемном отношении 3:1:

1. воды и нефти из Туймазинского месторождения (РБ)
2. воды и нефтепродуктов (керосина).

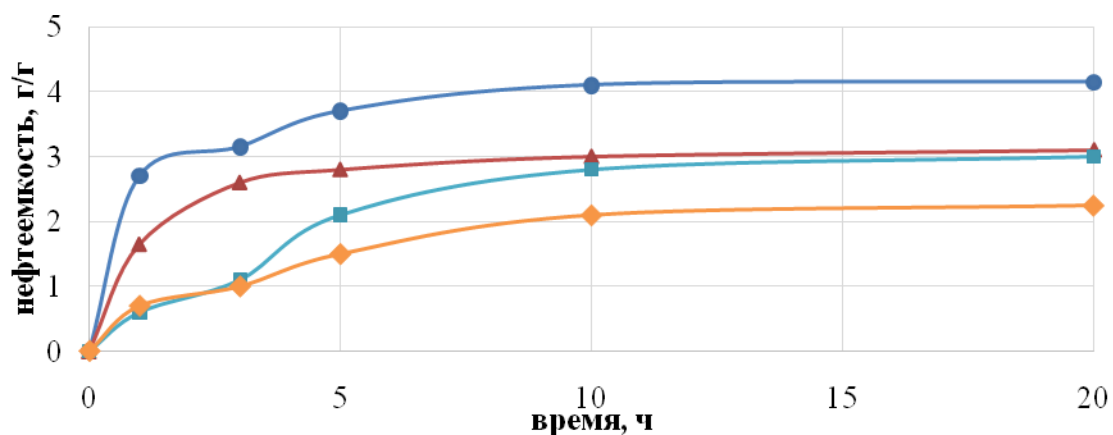
Оценка сорбционных свойств материалов производилась гравиметрическим методом.

Результаты нефтеемкости керосина и нефти различными сорбентами представлены на рис. 1.

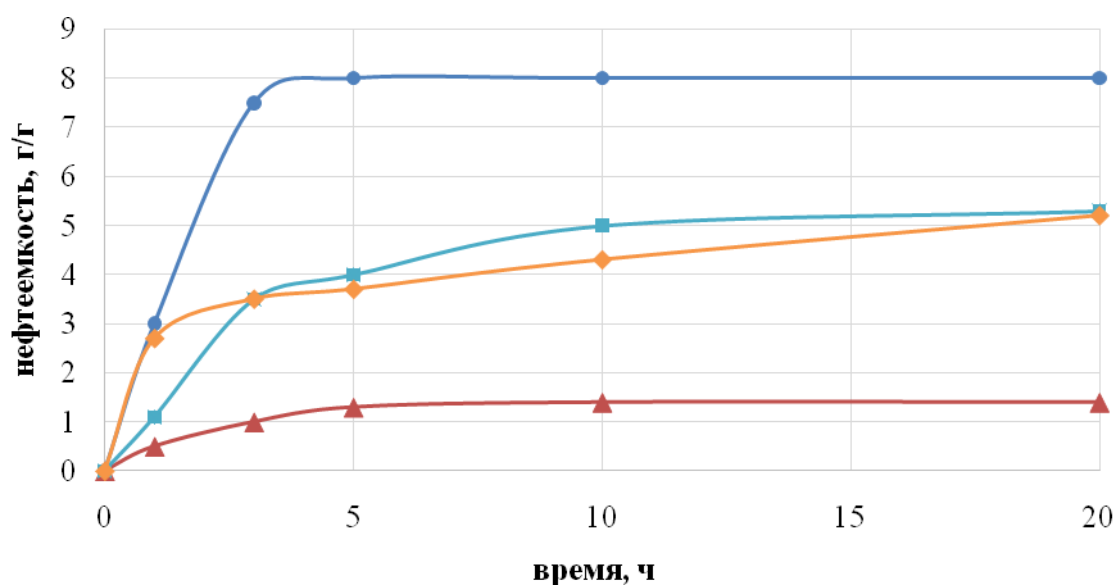
Полученные результаты позволяют заключить следующее. Из исследованных сорбентов лучшие результаты показателю сорбционной ёмкости по отношению к керосину получены при использовании древесных опилок (4,15 г/г). Нефтеёмкости торфа и макулатуры сравнимы по величине (3,1 г/г и 3 г/г). Сухая древесина поглощает керосин в количестве 2,25 г/г. Полученные результаты позволяют расположить исследованные сорбенты в следующем порядке:

сухая древесина < макулатура < торф < древесные опилки

Что касается кинетики сорбции, то основная масса керосина поглощается всеми исследованными сорбентами в течение первых 5 часов контакта, далее этот процесс протекает менее интенсивно. Адсорбционное равновесие достигается через 10 часов контакта кроме сухой древесины, нефтеёмкость которой за 10 часов контакта составляет 95,45 %.



а)



б)

Рис. 1. Экспериментальные изотермы адсорбции керосина (а) и нефти (б) на различных материалах: ● – древесные опилки; ▲ – торф; ■ – макулатура; ◆ – древесина

Общая тенденция сорбционной активности исследованных сорбентов по отношению к нефти Туймазинского месторождения сохраняется на уровне керосина, однако есть существенная разница в их нефтеёмкости. Значение нефтеёмкости для большинства сорбентов возросло в среднем в 2 раза. Исключение составляет торф, нефтеёмкость которого снизилась с 3,1 г/г в случае керосина до 1,4 г/г при сорбции нефти.

Заслуживает внимания тот факт, что в случае сорбции нефти практически одинаковой эффективностью характеризуются макулатура

и сухая древесина. Как и в случае керосина, основная нефти масса поглощается исследованными сорбентами в течение первых 5 часов контакта, а оптимальное время контакта всех исследованных сорбентов в среднем составляет 10 ч.

Проведенный анализ методов сорбционной очистки воды от нефтяных загрязнений указывает на перспективу использования в этом процессе углеродсодержащих сорбентов, полученных из природного сырья, так как они показали достаточно высокие значения по нефти и керосину. Достоинствами их также являются экологическая чистота, безреагентная технология получения, простота утилизации отработавшего сорбента термическим методом. Данные материалы могут успешно конкурировать с прочими видами промышленно выпускаемых сорбентов.

Работа выполнена в рамках проектной части государственного задания в сфере научной деятельности (№13.405.2014/К).

Список литературы

1. Каменщиков Ф.А., Богомольный Е.И. Нефтяные сорбенты. – М.–Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2005.
2. Климов Е.С., Бузаева М.В. Природные сорбенты и комплексоны в очистке сточных вод. – Ульяновск : УлГТУ, 2011. – 201 с.
3. ТУ-13-539-85. Отходы древесные, технические условия.

EVALUATION OF THE EFFECTIVENESS OF SORPTION MATERIALS FOR THE ELIMINATION OF OIL SPILLS

E.S. DREMICHEVA

FSBEI NPE «Kazan power-engineering university», Kazan

Annotation. The paper considers the process of sorption of oil and oil products on various materials of organic nature.

Key letters: oil spills, sorbents, oil capacity.

УДК 66.021.3/4

ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СТРУЙНО-БАРБОТАЖНЫХ КОНТАКТНЫХ УСТРОЙСТВ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕПЛОМАССОБМЕННЫХ АППАРАТОВ

А.В. ДМИТРИЕВ*, О.С. ДМИТРИЕВА**, И.Н. МАДЫШЕВ**

*ФГБОУ ВПО «Казанский государственный энергетический университет»,
г. Казань

**ФГБОУ ВПО «Казанский национальный исследовательский
технологический университет», г. Казань

Аннотация. Предложено струйно-барботажное контактное устройство для теплообменных аппаратов. Отличительной особенностью струйно-барботажных контактных устройств является организация оригинального взаимодействия между газом и жидкостью, позволяющая интенсифицировать тепло- и массообменные процессы при относительно простом аппаратном оформлении. Представлены результаты исследования по определению минимального размера газового пузыря.

Ключевые слова: энергоэффективность, контактное устройство, барботаж, теплообмен.

В настоящее время проблема повышения энергоэффективности является одной из наиболее актуальных задач для обеспечения устойчивого инновационного развития экономики России. Согласно статистическим данным Международного экономического агентства (International Energy Agency, IEA), главным потребителем энергии в Российской экономике является промышленный сектор [1]. Сравнение России с другими странами по показателю энергоемкости предприятий топливно-энергетического комплекса (ТЭК) показывает огромные резервы повышения эффективности использования энергии. Энергоемкость химических, нефтехимических и нефтегазоперерабатывающих производств существенно превосходит аналогичные показатели развитых стран (в основном на 20–60 % [2]). В связи с этим снижение энергоемкости промышленных установок предприятий ТЭК является актуальной задачей, решение которой позволит повысить степень энергетической безопасности

страны, повысить конкурентоспособность отечественных предприятий и снизить негативное воздействие на окружающую среду [3].

Одним из наиболее эффективных способов энергосбережения является модернизация существующих теплообменных аппаратов, которая заключается в использовании современных высокоэффективных контактных устройств. В настоящее время в колонных аппаратах с газо-(паро)-жидкостными средами используются контактные устройства как зарубежных, так и отечественных фирм [4–6]. Однако многие конструкции малоэффективны с точки зрения достижения высокой интенсификации теплообменных процессов при минимальных затратах энергии. В связи с этим необходима разработка новых устройств для контакта газа и жидкости, способных обеспечить наиболее эффективные и интенсивные гидродинамические режимы с минимальным гидравлическим сопротивлением.

Примером такой конструкции может быть струйно-барботажное контактное устройство для теплообменных аппаратов [7], показанное на рис. 1. Предлагаемое контактное устройство состоит из сливных стаканов 1, имеющих вертикальные стенки, необходимые для поддержания уровня жидкости внутри них. Стаканы 1 в каждом ряду соединены между собой с помощью стержней 2, открыты с верхнего своего конца, а нижний конец (днище) снабжен некоторым множеством отверстий 3, необходимых для слива жидкости на расположенный ниже сливной стакан 1. Схема взаимодействия потоков газа и жидкости в предлагаемом струйно-барботажном контактном устройстве представлена на рис. 2.

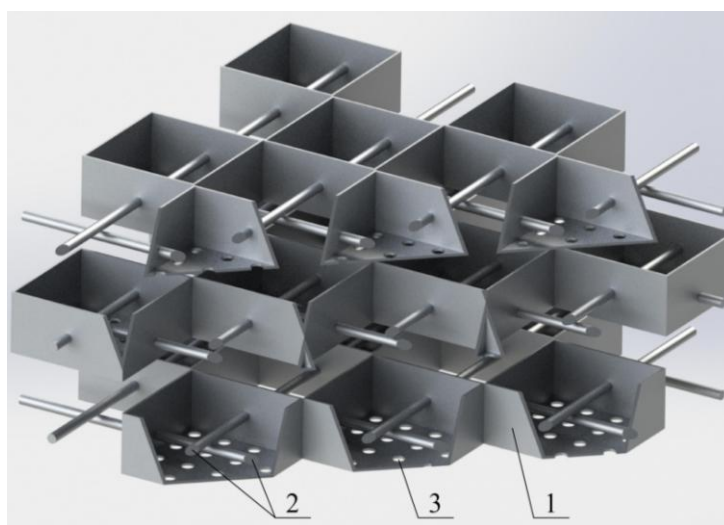


Рис. 1. Струйно-барботажное контактное устройство:
1 – сливной стакан; 2 – стержень; 3 – отверстия

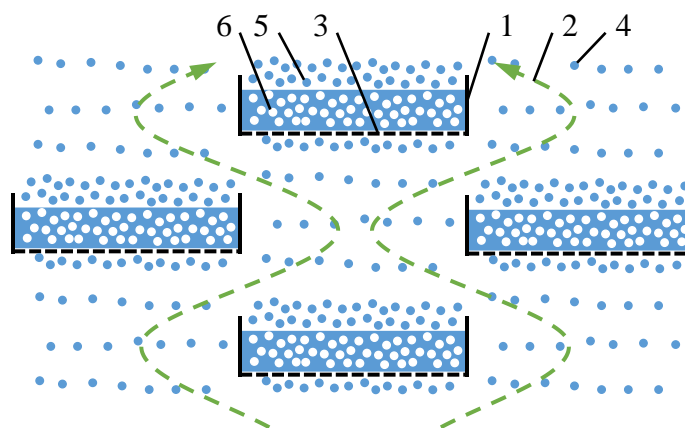


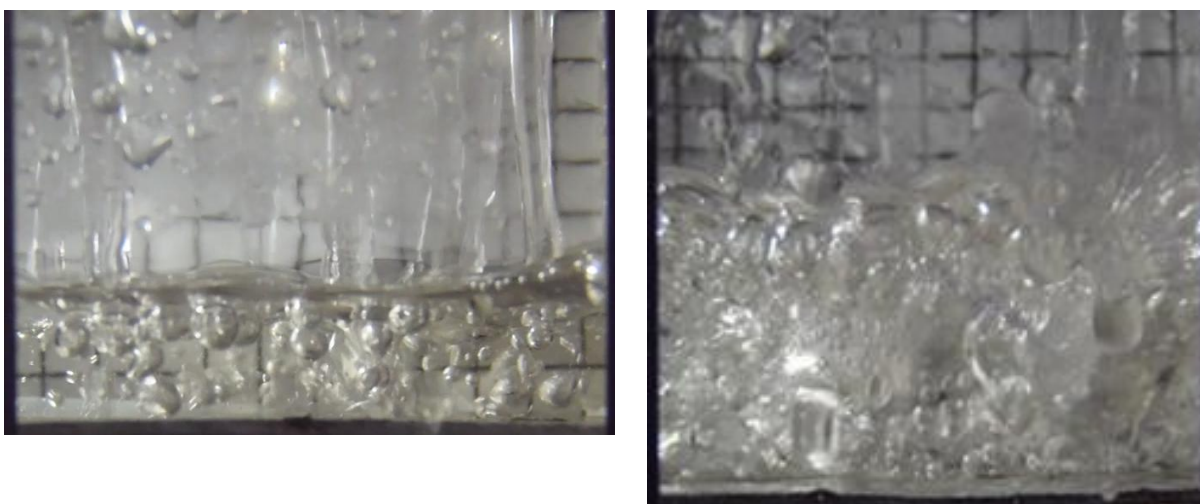
Рис. 2. Схема взаимодействия потоков газа и жидкости в струйно-барботажном контактном устройстве: 1 – сливной стакан; 2 – поток газа; 3 – перфорированное днище; 4 – капли, образованные перфорированным устройством; 5 – капли, вылетающие из жидкости; 6 – пузыри

Разработанное авторами настоящей статьи струйно-барботажное контактное устройство работает следующим образом. Жидкость через множество отверстий 3, выполненных в днище сливных стаканов 1, диспергируется в виде струй на расположенный ниже сливной стакан 1. При этом в указанных сливных стаканах 1 поддерживается уровень жидкости за счет наличия вертикальных стенок сливных стаканов. Сливные стаканы 1 располагают горизонтально в шахматном порядке, образуя тарелку. Причем ниже расположенная тарелка имеет смещение стаканов, формируя шахматное их расположение по вертикали. По этой причине, газ, поступающий снизу под тарелку, приобретает зигзагообразный характер движения (рис. 2).

При движении струй жидкости происходит их распад с образованием множества капель. Последние, соударяясь о поверхность жидкости, находящейся внутри стаканов 1, разлетаются в разные стороны брызгами. Таким образом, создается развитая постоянно обновляющаяся поверхность контакта фаз, которая определяется наличием относительно небольших газовых пузырей в слое жидкости и вылетающими каплями с поверхности. Кроме того, восходящий поток газа контактирует с падающими струями или каплями жидкости, при этом образуется вторая зона контакта газа и жидкости. Принимая расстояние между сливными стаканами на одном уровне, равными ширине сливного стакана, обеспечивается равнопроточность для прохода газа, что приводит к снижению гидравлического сопротивления предлагаемого струйно-барботажного

контактного устройства. Для обеспечения максимальной эффективности тепломассообменных процессов сливные стаканы в поперечном сечении имеют форму квадрата. Таким образом, организация оригинального взаимодействия между газом и жидкостью позволяет интенсифицировать тепло- и массообменные процессы как в жидкой, так и в газовой фазах при относительно простом аппаратном оформлении.

Как показывают проведенные экспериментальные исследования гидродинамики барботажного слоя в контактных элементах, в подвижной жидкости имеются газовые пузыри двигающиеся в противоположном направлении (рис. 3). В связи с этим, целью проводимых численных исследований является определение минимального размера пузыря, необходимого для его всплытия.



а)

б)

Рис. 3. Фотография барботажного слоя в предлагаемом контактном устройстве

Скорость жидкости в контактном элементе определяется:

$$U_{\text{срк}} = U_{\text{ср}} \frac{n_0 \pi d_0^2}{4b^2}, \quad (1)$$

где $U_{\text{ср}}$ – среднерасходная скорость истечения жидкости из сливных отверстий, м/с; b – ширина контактного элемента, м; n_0 – количество отверстий в одном контактном элементе; d_0 – диаметр отверстий, м.

Среднерасходную скорость истечения жидкости можно определить из уравнения расхода:

$$U_{\text{ср}} = \frac{4L_V}{n_0\pi d_0^2}, \quad (2)$$

где L_V – объемный расход жидкости, м³/с.

С учетом (2), выражение (1) запишется:

$$U_{\text{срк}} = \frac{L_V}{b^2}. \quad (3)$$

Установившаяся скорость всплытия газового пузыря может быть найдена из уравнения:

$$\frac{\pi a_G^3}{6} \rho_L g = c_a \frac{\pi a_G^2}{4} \frac{\rho_L}{2} W_a^2,$$

где W_a – установившаяся скорость всплытия, м/с; ρ_L – плотность жидкости, кг/м³; a_G – диаметр газового пузыря, м; c_a – коэффициент сопротивления; g – ускорение свободного падения, м/с².

Минимальный диаметр пузыря можно определить из условия:

$$W_a > U_{\text{срк}}.$$

После преобразования получим:

$$\sqrt{\frac{4}{3} \frac{g a_G}{c_a}} > U_{\text{срк}}.$$

Тогда

$$a_{G \text{ min}} = \frac{3}{4} \frac{c_a}{g} U_{\text{срк}}^2. \quad (4)$$

Для стоксового режима движения пузыря выражение (4) можно записать:

$$a_{G \text{ min}} = \sqrt{\frac{18\nu_L U_{\text{срк}}}{g}}, \quad (5)$$

где ν_L – кинематический коэффициент вязкости жидкости, м²/с.

С учетом (3) выражение (5) можно записать:

$$a_{G \text{ min}} = \frac{1}{b} \sqrt{\frac{18\nu_L L_V}{g}}.$$

Расчеты проводились для системы воздух – вода при температуре 20 °С, при различных геометрических параметрах контактного устройства. Результаты расчетов показали, что на минимальный диаметр газового пузыря оказывают влияние величина расхода жидкости, ее физические свойства, а также особенности конструктивного исполнения предлагаемого контактного устройства.

Как видно из графика, представленного на рис. 4, увеличение ширины контактного элемента приводит к обратно пропорциональному уменьшению минимального диаметра газового пузыря, необходимого для всплытия. Следует отметить, что при увеличении расхода жидкости минимальный диаметр пузыря так же увеличивается.

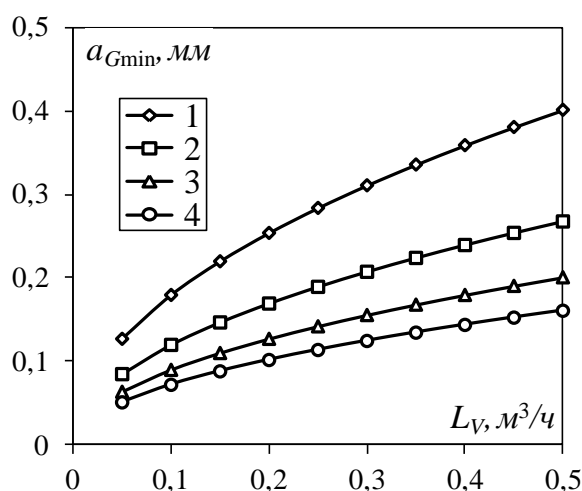


Рис. 4. Зависимость минимального диаметра газового пузыря от объемного расхода жидкости при b , м: 1 – 0,04; 2 – 0,06; 3 – 0,08; 4 – 0,1

Таким образом, проведенные оценочные расчеты хорошо согласуются с экспериментальными данными, т.е. большинство образующихся газовых пузырей (95–99 %) всплывают к поверхности раздела газ – жидкость.

Выполненные исследования позволяют утверждать, что использование предлагаемых струйно-барботажных контактных устройств позволит создавать высокоэффективные контактные теплообменные аппараты при невысоких энергетических затратах на проведение процесса.

Список литературы

1. Яковлев А.С., Барышева Г.А. Энергоэффективность и энергосбережение в России на фоне опыта зарубежных стран // Известия Томского политехнического университета. – 2012. – Т. 321. – № 6. – С. 25–30.

2. Ясавеев Х.Н., Лаптев А.Г., Фарахов М.И. Модернизация установок переработки углеводородных смесей. – Казань: Изд-во «ФЭН», 2004. – 307 с.

3. Галеева А.Р., Газизова О.В. Энергоэффективность – основа устойчивого развития экономики страны // Вестник Казанского технологического университета. – 2014. – Т. 17. – № 8. – С. 372–376.

4. Каган А.М., Лаптев А.Г., Пушнов А.С., Фарахов М.И. Контактные насадки промышленных теплообменных аппаратов. – Казань: Отечество, 2013. – 454 с.

5. Повтарев И.А., Блиничев В.Н., Чагин О.В., Кравчик Я. Влияние типа контактного устройства колонного оборудования на гидравлическое сопротивление насадочного слоя // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2008. – № 3. – С. 12–13.

6. Лаптев А.Г., Фарахов М.И., Минеев Н.Г. Основы расчета и модернизация теплообменных установок в нефтехимии. – Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2010. – 574 с.

7. Струйно-барботажное контактное устройство для теплообменных процессов: заявка на полезную модель № 2015119123 (029613) / Дмитриев А.В., Дмитриева О.С., Мадышев И.Н., Сагдеева Г.С., Николаев А.Н.; заявл. 30.04.2015.

PROSPECTS OF USING JET-BUBBLE CONTACT FACILITIES TO INCREASE ENERGY EFFICIENCY OF HEAT AND MASS TRANSFER APPARATUSES

A.V. DMITRIEV*, O.S. DMITRIEVA**, I.N. MADYSHEV**

*FSBEI HPE «Kazan power-engineering university», Kazan

**FSBEI HPE «Kazan national research technological university», Kazan

Abstract. Proposed is a jet-bubbling contact device for heat and mass transfer apparatus. A distinctive feature of the jet-bubble contact devices is the original organization of interaction between the gas and the liquid, allows to intensify the heat and mass transfer processes in a relatively simple hardware design. The results of research into to determine the minimum size of the gas bubble.

Keywords: energy efficiency, contact device, bubbling, heat and mass transfer.

УДК 620.193.15; 620.197.3

ЭКОЛОГИЧЕСКИ БЕЗОПАСНЫЕ ИНГИБИТОРЫ ДЛЯ СИСТЕМ ВОДООБОРОТА НЕФТЕХИМИЧЕСКИХ ПРОИЗВОДСТВ

Д.И. ХАСАНОВА, Д.Х. САФИН*, Е.А. КОВРИЖНЫХ
ПАО «Нижнекамскнефтехим», г. Нижнекамск Республика Татарстан
*ФГБОУ ВПО «Казанский национальный исследовательский
технологический университет»

Аннотация. Разработан новый экологически безопасный, комплексный ингибитор коррозии и солеотложений для обработки охлаждающей воды – ОПЦ-800. Гравиметрическим методом установлено, что ингибитор проявляет максимальный защитный эффект от коррозии углеродистой стали и выпадения карбоната кальция при дозе 50 мг/л. Реагент эффективен в водных средах с низким и средним содержанием в температурном диапазоне от 25 до 75 °С. Представлены данные опытно-промышленных испытаний применения данного ингибитора в системе оборотного водоснабжения ПАО «Нижнекамскнефтехим».

Ключевые слова: оборотное водоснабжение, комплексный ингибитор коррозии и солеотложений.

В настоящее время в большинстве нефтехимических и нефтеперерабатывающих компаниях РФ в системах оборотного водоснабжения преобладающим остается использование реагентов зарубежных компаний. Этим можно объяснить актуальность и важность задачи создания эффективных, экологически безопасных технологий обработки систем водооборота. Известные российские технологии обработки систем водооборота основаны на использовании ингибиторов коррозии и солеотложений в основном неорганических производных фосфатов, например полифосфатов (триполифосфат), метафосфат (гексаметафосфат), пирофосфаты. Известно, что по экологической безопасности фосфаты являются вредными для природы реагентами и способствуют обогащению рек, озер биогенами, сопровождающееся бурным развитием водорослей («цветение» вод и эвтрофикация), дефицитом кислорода и вымиранием рыб [1].

Следует отметить, что широко применяемые в нефтехимической промышленности эффективные технологии обработки систем оборотного

водоснабжения компаний «GE Water&Process Technologies», «Nalco», «Ashland» основаны на использовании фосфат-содержащих реагентов. Ограничения по содержанию фосфатов в продувочной воде систем водооборота и в сточных водах нефтехимических производств в целом требуют создания новых экологически безопасных технологии обработки воды. Одним из таких направлений являются разработки, основанные на использование фосфорсодержащих органических кислот – фосфоновых кислот. Указанные реагенты содержат в своем составе меньше фосфора, обеспечивают эффективную защиту оборудования при низких содержаниях ингибитора в оборотной воде.

В связи с наметившейся тенденцией ограничения применения фосфатов органические производные фосфора имеют широкое применение в составах ингибиторов коррозии и солеотложений для систем водооборота, что основано на их низкой токсичности, доступности, а также полифункциональности их свойств.

К таким производным фосфора можно отнести оксиэтилидендифосфовую кислоту (ОЭДФ), 2-фосфобутан-1,2,4-трикарбоновую кислоту (ФБТК), которые широко используются в различных отраслях промышленности в качестве комплексообразователя, ингибитора коррозии и солеотложений. Важными свойствами этих продуктов является низкая токсичность по отношению к окружающей среде и человеку, устойчивость в гипохлоритных средах, легкая биоразлагаемость [2].

Совместное использование органофосфоновых кислот с такими водорастворимыми полимерами, как полиакриловая или полиметакриловая кислота, за счет «синергетического эффекта» усиливает комплексообразующее действие этих кислот. Важным резервом повышения эффективности защиты стального оборудования является создание композиционных ингибиторов солеотложений и коррозии, содержащих помимо органофосфоновых кислот и их производных, вещества, повышающие стабильность защитных пленок. Можно предположить, что системы на основе смесей полимеров и фосфонатов могут обладать более эффективными защитными свойствами, чем монорецептуры. Низкая токсичность подобного сочетания позволяет использовать данные реагенты даже при жестких требованиях к качеству сточных вод.

В данной работе представлены результаты лабораторных и промышленных испытаний универсального ингибитора коррозии и солеотложений, выпускаемого в промышленном масштабе под торговой

маркой ОПЦ-800 и используемого в системах оборотного водоснабжения нефтехимических производств, таких как ПАО «Нижекамскнефтехим», ОАО «Танеко», ОАО «Казаньоргсинтез».

С целью определения оптимальных технологических параметров, при которых ингибитор ОПЦ-800 будет проявлять максимальный защитный эффект, проведены гравиметрические испытания стальных образцов. Гравиметрические и электрохимические испытания проводили на модельных растворах, имитирующих охлаждающую воду с различной степенью упаривания и минерализации, а так же на упаренной в 2 раза воде реки Кама (табл. 1). Исследовались различные концентрации ингибитора ОПЦ-800 (20, 40, 50, 60, 80 мг/л) в низко-, средне-, и высокоминерализованных водных средах при температуре 50 °С (табл. 2).

Таблица 1

Показатели качества модельных растворов и упаренной воды реки Кама

| Показатели | Модельные растворы | | | Упаренная вода реки Кама |
|----------------------------|--------------------|------|------|--------------------------|
| | МВ1 | МВ2 | МВ3 | |
| рН, ед. | 8,3 | 8,3 | 8,2 | 8,4 |
| Солесодержание, мг/л | 551 | 1523 | 2830 | 720 |
| Общая щелочность, мэкв/л | 1,9 | 5,9 | 5,9 | 2,2 |
| Жесткость, мэкв/л | 4,6 | 13,8 | 22,4 | 4,8 |
| Содержание кальция, мэкв/л | 3,1 | 9,5 | 16,9 | 3,7 |
| Содержание сульфатов, мг/л | 210 | 550 | 850 | 275 |
| Содержание хлоридов, мг/л | 65 | 124 | 200 | 120 |

С ростом общего солесодержания возрастает степень пересыщения воды по содержанию ионов Ca^{2+} , HCO_3^- и, следовательно, возрастает вероятность образования карбонатных отложений (табл. 2). Для предотвращения образования карбоната кальция с ростом общего солесодержания воды необходимо увеличивать дозу ингибитора. Ингибитор ОПЦ-800 показал высокую эффективность в низко- и среднеминерализованном модельном растворе при оптимальной дозировке 50–60 мг/л. Ингибитор ОПЦ-800 с концентрациями 40, 60, 80 мг/л способствует сохранению стабильности модельного раствора и эффективно предотвращает выпадение карбоната, фосфоната кальция. Ингибитор ОПЦ-800 обладает высокой стабильностью во времени.

Сравнительные данные эффективности ингибитора марки ОПЦ-800
в зависимости от минерализации модельной воды

| Испытуемая среда | Концентрация ингибитора, мг/л | Са, мэкв/л | | Э, % | Скорость коррозии, г/м ² ·ч | Z, % | γ, % |
|------------------|-------------------------------|------------|------|------|--|------|------|
| | | нач. | кон. | | | | |
| МВ1 | Контроль | 3,1 | 2,8 | - | 1,4983 | - | - |
| | 20 | -«- | 3,1 | 100 | 0,5561 | 63 | 2,7 |
| | 40 | -«- | 3,1 | 100 | 0,1589 | 89 | 9,4 |
| | 50 | -«- | 3,1 | 100 | 0,1218 | 92 | 12,3 |
| | 60 | -«- | 3,1 | 100 | 0,1290 | 91 | 11,6 |
| | 80 | -«- | 3,1 | 100 | 0,1287 | 91 | 11,6 |
| МВ3 | Контроль | 10,0 | 6,1 | - | 1,1314 | - | - |
| | 20 | -«- | 9,1 | 77 | 0,8357 | 27 | 1,35 |
| | 40 | -«- | 10,0 | 100 | 0,2160 | 81 | 5,2 |
| | 50 | -«- | 9,8 | 90 | 0,1554 | 86 | 7,3 |
| | 60 | -«- | 9,9 | 97 | 0,1305 | 89 | 8,7 |
| | 80 | -«- | 9,9 | 97 | 0,1214 | 89 | 9,3 |
| МВ5 | Контроль | 17,2 | 13,1 | - | 0,9394 | - | - |
| | 20 | -«- | 14,6 | 37 | 0,7367 | 22 | 1,3 |
| | 40 | -«- | 16,4 | 80 | 0,3723 | 60 | 2,5 |
| | 50 | -«- | 16,8 | 90 | 0,1898 | 80 | 4,9 |
| | 60 | -«- | 17,0 | 95 | 0,1225 | 87 | 7,7 |
| | 80 | -«- | 17,0 | 95 | 0,1233 | 86 | 7,6 |

Для дальнейших исследований выбрана оптимальная концентрация ингибитора ОПЦ-800 – 50 мг/л. В табл. 3 представлена зависимость эффективности исследуемого ингибитора от щелочности воды при различных температурах. Щелочность является важным показателем качества воды, с увеличением которой при концентрировании исходной воды происходит интенсификация отложений карбоната кальция. Температура охлаждающей воды в реальной системе составляет 25–40 °С, при этом температура воды в пристеночном слое может достигать 75–80 °С, поэтому для исследования был выбран температурный интервал от 25 до 75 °С [3].

При увеличении щелочности до 8,0–10,0 мэкв/л стабильность воды сохраняется во всем температурном диапазоне от 25 до 75 °С (табл. 3).

Однако, на практике рекомендуется проводить режим ингибирования при щелочности воды не выше 8,0 мэкв/дм³. Предельным значением индекса Ланжелье для воды, ингибированной реагентом марки ОПЦ-800, составляет 3,4–3,6.

Таблица 3

Эффективность ингибитора марки ОПЦ-800 с концентрацией 50 мг/л в модельном растворе МВЗ с различной щелочностью в зависимости от температуры

| Щелочность, мэкв/дм ³ | $t = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ | | | | $t = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ | | | | $t = 75\text{ }^{\circ}\text{C}$ | | | |
|-------------------------------------|----------------------------------|-----|-----|----|----------------------------------|-----|-----|----|----------------------------------|-----|-----|----|
| | pH _к | J | Э | Z | pH _к | J | Э | Z | pH _к | J | Э | Z |
| 3,00 | 8,4 | 1,5 | 75 | 87 | 8,7 | 2,3 | 20 | 82 | 9,0 | 2,9 | 89 | 81 |
| 4,00 | 8,5 | 1,7 | 33 | 89 | 8,7 | 2,3 | 89 | 79 | 9,1 | 3,1 | 87 | 83 |
| 6,00 | 8,5 | 1,9 | 100 | 85 | 8,8 | 2,6 | 97 | 88 | 9,2 | 3,4 | 100 | 84 |
| 8,00 | 8,6 | 2,2 | 100 | 88 | 8,8 | 2,7 | 100 | 84 | 9,2 | 3,6 | 100 | 90 |
| 10,00 | 8,5 | 2,1 | 100 | 90 | 8,8 | 2,8 | 96 | 82 | 9,1 | 3,5 | 96 | 90 |

В связи с тем, что скорость и характер разрушения металла, интенсификация накипеобразования в реальных условиях зависят от внешних факторов среды, коррозионные испытания проводили в реальной подпиточной воде (реки Кама).

Была проведена оценка эффективности исследуемого ингибитора марки ОПЦ-800 на примере упаренной подпиточной воды при концентрации 50 мг/л (табл. 4).

Таблица 4

Эффективность ингибитора марки ОПЦ-800 в упаренной подпиточной воде в зависимости от температуры

| Концентрация ингибитора, мг/л | Температура, $^{\circ}\text{C}$ | |
|-------------------------------|---------------------------------|-------|
| | 30 | 50 |
| | Э/Z | Э/Z |
| 20 | 80/81 | 65/70 |
| 40 | 93/90 | 85/74 |
| 50 | 100/91 | 95/86 |
| 60 | 99/91 | 95/86 |
| 80 | 94/94 | 90/96 |

Исследуемый ингибитор даже при малых концентрациях способен эффективно защитить углеродистую сталь в реальной охлаждающей воде от накипеобразования (табл. 5). Как известно, ингибиторы, содержащие фосфоновые группы, способствуют увеличению удельной поверхностной энергии зародыша, его радиуса, уменьшению скорости зародышеобразования. В температурном диапазоне 30–50 °С ингибитор марки ОПЦ-800 проявляет высокую защитную способность при $C_{\text{инг.}} = 50\text{--}60 \text{ мг/дм}^3$.

Таблица 5

Содержание ортофосфатов в исследуемых дозах ингибитора ОПЦ-800

| Концентрация ингибитора ОПЦ-800, мг/л | Содержание общего фосфора, мг/л | Содержание ортофосфатов (PO_4^{3-}), мг/л |
|---------------------------------------|---------------------------------|--|
| 20 | 1,5 | 0,031 |
| 40 | 2,5 | 0,058 |
| 50 | 3,5 | 0,070 |
| 60 | 4,6 | 0,088 |
| 80 | 5,9 | 0,095 |
| 100 | 7,1 | 0,110 |

Электрохимическое поведение углеродистой стали в среде упаренной подпиточной воды с добавлением 50 мг/дм³ ингибитора марки ОПЦ-800 сопоставимо с результатами гравиметрических исследований. В присутствии ингибитора при температуре 50 °С снижается скорость как катодного, так и анодного процесса, т.е. реагент относится к ингибиторам коррозии смешанного типа (рис. 1).

Поскольку целью данного исследования является изучение ингибиторов коррозии с низким содержанием фосфора, в ходе испытаний определяли концентрацию ортофосфатов в исследуемых дозах ингибиторов (табл. 5).

Оптимальная доза ингибитора ОПЦ-800 – 50 мг/л содержат допустимые количества биогенного фосфора и концентрации фосфатов ниже регламентированных для сброса сточных вод значений, т.е. менее 3,5 мг/дм³.

Как видно из поляризационных кривых, полученных в растворе упаренной подпиточной воды, ингибитор марки ОПЦ-800 оказывает существенное влияние на кинетику обеих электродных реакций.

В присутствии ОПЦ-800 потенциал стали облагораживается, что объясняется адсорбцией комплексоната и формированием на поверхности или вблизи нее труднорастворимых полиядерных комплексов. Так, при введении 50 мг/л ингибитора происходит снижение плотности тока коррозии с $-0,7$ до $-1,26$ мкА/см^2 . Катодную защиту обеспечивает фосфонат и комплекс фосфоната с кальцием, содержащимся в воде. Кроме того, наличие фосфорсодержащих комплексонов приводит к образованию микрокристаллов карбоната кальция с отрицательно заряженными мицеллами, обеспечивающими устойчивость коллоидной системы из-за взаимного отталкивания заряженных частиц и отталкивание частиц от отрицательно заряженной поверхности теплообменного оборудования [5].

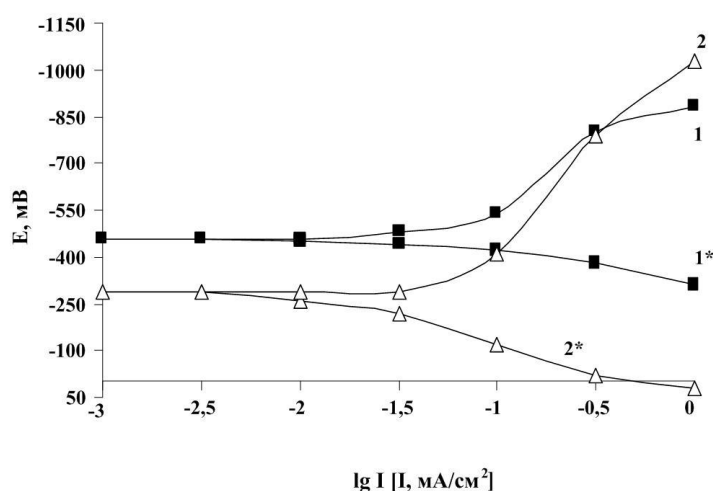


Рис. 1. Катодные (1, 2) и анодные (1*, 2*) поляризационные кривые на Ст3 в среде упаренной подпиточной воды:

1 – без ингибитора; 2 – ингибитор ОПЦ-800 (50 мг/л)

Результаты, полученные методом поляризационного сопротивления при температуре 25 °С и перемешивании раствора упаренной подпиточной воды показывают, что в контрольном опыте наблюдается первоначальное снижение коррозионной агрессивности, вероятно, за счет адсорбции природных органических комплексов, присутствующих в речной воде. Далее наблюдается рост коррозии и стабилизация за счет формирования оксидного слоя на уровне $0,25$ – $0,3$ мм/год. При добавлении 20 мг/л ингибитора ОПЦ-800 в начальный момент времени происходит рост скорости коррозии, а затем наблюдается ее спад (рис. 2). Повышение

коррозионной агрессивности среды в данном случае связано, видимо, с низкой концентрацией ингибитора в пристеночной зоне, а, как известно, низкая концентрация ингибитора стимулирует процесс коррозии [4]. По мере адсорбции ингибитора на металле происходит пассивация поверхности. Необходимо отметить, что при низких дозировках ингибитора время формирования защитной пленки увеличивается в 3–4 раза. При дозировке ингибитора 50 мг/л интенсивно замедляется коррозия стали, при этом мгновенная скорость коррозии, полученная методом поляризационного сопротивления стремится к нулю, а время формирования защитной пленки составляет 40–50 минут.

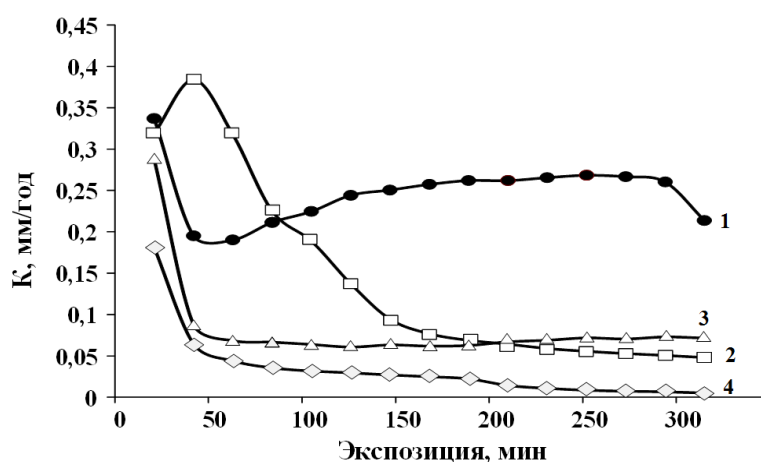


Рис. 2. Изменение мгновенной скорости коррозии Ст3 во времени в упаренной реальной подпиточной воде: 1 – без ингибитора; 2 – ингибитор ОПЦ-800 (20 мг/л); 3 – ингибитор ОПЦ-800 (40 мг/л); 4 – ингибитор ОПЦ-800 (50 мг/л)

На основе вышеизложенных данных разработана программа обработки систем водооборота ПАО «Нижнекамскнефтехим». Подпиточная вода – осветленная вода реки Кама, характеризуется высокой жесткостью, щелочностью и содержанием коррозионно-агрессивных анионов – хлоридов и сульфатов. С целью экономии свежей подпиточной воды оборотная система эксплуатируется в беспродувочном режиме с высоким коэффициентом упаривания и солесодержания. В результате гравиметрических испытаний образцов-свидетелей из углеродистой стали Ст3, установленных в змеевике на линии обратной оборотной воды установлено, что скорость коррозии при обработке оборотной воды ингибитором ОПЦ-800 составляет 0,008–0,015 мм/год (табл. 6). Дополнительным преимуществом данного ингибитора является отсутствие подкисления воды, несмотря на высокую жесткость оборотной воды

до 1000 мг/дм³ (в пересчете на CaCO₃), что, в сравнении с другими технологиями, позволяет снизить содержание сульфатов в сточной воде. Для предупреждения солевых отложений обратную воду до недавнего времени подкисляли серной кислотой, в качестве ингибиторов коррозии при этом использовались реагенты на основе ортофосфатов.

Таблица 6

Скорость коррозии углеродистой стали Ст3 в охлаждающей воде, обработанной ингибитором ОПЦ-800

| Период установки | Время экспозиции, ч | Скорость коррозии, мм/год. |
|--------------------|---------------------|----------------------------|
| Июль – август | 672 | 0,033 |
| август – сентябрь | 768 | 0,008 |
| сентябрь – октябрь | 696 | 0,009 |
| октябрь – ноябрь | 792 | 0,015 |
| Ноябрь-декабрь | 864 | 0,015 |

Вывод

1. Потенциостатическими исследованиями ингибитора марки ОПЦ-800 установлено, что реагент относится к ингибиторам смешанного действия, обеспечивает высокую степень защиты углеродистой стали в воде низкой и средней минерализации. Ингибитор эффективно снижает вероятность солевых отложений, сохраняя стабильность воды в температурном диапазоне от 25 до 75 °С .

2. Опытно-промышленными испытаниями на системах водооборота ПАО «Нижекамскнефтехим» установлена высокая эффективность ингибитора марки ОПЦ-800. При этом наблюдается значительное снижение содержания в сточных водах фосфатов и сульфатов, что позволяет рекомендовать данную разработку к промышленному применению, как экологически безопасную технологию.

Список литературы

1. Балабан-Ирменин Ю.В., Рудакова Г.Я. Применение антинакипинов в энергетике низких параметров. – М.: Новости теплоснабжения, 2011.

2. Коробейникова Е.Ю., Автономова А.Ю. Гетеролигандное комплексообразование меди с 2-фосфонобутан-1,2,4-трикарбоновой

кислотой и карбоновыми кислотами в водных растворах // Вестник удмуртского университета. – 2012. – Вып. 2.

3. ГОСТ 9.502-82. Ингибиторы коррозии металлов для водных систем. Методы коррозионных испытаний. – М.: Изд-во стандартов, 1988.

4. Kemmer F.N. The Nalco Water Handbook, Second Edition. McGraw-Hill Book Company 1989.

ENVIRONMENTALLY FRIENDLY INHIBITORS FOR PETROCHEMICAL PRODUCTION WATER RECYCLING SYSTEMS

D.I. KHASANOVA, D.KH. SAFIN*, E.A. KOVRIZHNYH

PJSC «Nizhnekamskneftekhim»

*FSBE HPE «Kazan National Research Technological University»

Annotation. There was developed a new environmentally friendly complex corrosion and scale inhibitor for cooling water treatment – OPC-800. It is established by gravimetric method that inhibitor has the maximum protection against carbon steel corrosion and calcium carbonate deposition at a dose of 50 mg/L. Reagent is effective in aqueous phase with low or medium salt content in the temperature range of 25 to 75 °C. The pilot tests data for application of this inhibitor in recycling water supply system of PJSC «Nizhnekamskneftekhim» are presented.

Key words: recycling water supply, complex corrosion and scale inhibitor.

УДК 628.16.081.3;628.161.2

СОРБЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ ОТ НЕФТЕПРОДУКТОВ ОТХОДОМ ВОДОПОДГОТОВКИ КТЭЦ-1

Л.А. НИКОЛАЕВА, М.А. ГОЛУБЧИКОВ

ФГБОУ ВПО «Казанский государственный энергетический университет»,
г. Казань

Исследован карбонатный илам КТЭЦ-1 в качестве сорбента нефтепродуктов. Выявлены недостатки илама как сорбента. Проведена серия экспериментов по улучшению эксплуатационных характеристик: сорбционной емкости по нефтепродуктам, плавучести. Представлены возможные пути утилизации отработанного сорбента.

Ключевые слова: карбонатный илам, нефтепродукты, сорбенты, утилизация, гранулирование, гидрофобизация.

В настоящее время в отечественной энергетике наметилась тенденция перевода тепловых электростанций на экологически чистые и бессточные технологии. Существенное снижение объема сточных вод ТЭС, вторичное использование отходов производства с возвратом в технологический цикл станции, многократное использование водного теплоносителя являются основными направлениями достижения экологической безопасности.

Складирование отходов и увеличение их количества в настоящее время становится все более актуальной проблемой на предприятиях. В настоящее время активно ведутся разработки в области утилизации отработанных отходов производства: выделение ценных компонентов, их переработка и вторичное использование в производственном цикле предприятия. В данной работе разработана технология переработки отхода водоподготовительной установки ТЭС с целью его вторичного использования для нужд станции, сокращение объемов шламоотвала и размера экологических штрафов.

Особую опасность представляют воды, загрязненные нефтью и нефтепродуктами (НП). Среди наиболее эффективных способов доочистки нефтесодержащих вод важная роль принадлежит адсорбции.

Авторами предлагается использование высушенного илама химводоочистки (ХВО) Казанской ТЭЦ-1 в качестве сорбционного

материала (СМ) НП. Шлам ХВО осветлителей ТЭС – продукт известкования и коагуляции, природная сырая и устойчивая смесь определенного состава. Химический состав и соотношение компонентов шлама зависит от химического состава сырой воды. Зольность исследуемого шлама составляет 89 %, органический углерод – 11 %, гуминовые кислоты – до 12 %. Шлам характеризуется мелкодисперсным составом, наличием на его поверхности полярных функциональных групп гуминовых веществ, шлама позволяет ему сорбировать нефть и НП [1].

В ранних работах при оценке эффективности шлама как СМ НП экспериментально были определены его сорбционная емкость, влагоемкость и плавучесть. Сорбционная емкость определена по отношению к ряду нефтепродуктов, наиболее распространенных в сточных водах промышленных предприятий: турбинному маслу, дизельному топливу, бензину, мазуту. Сорбционная емкость шлама определена по отношению к нефти Шийского месторождения (далее – нефть). Результаты исследования кинетики процесса адсорбции весовым методом в условиях погружения образца шлама в чистые образцы НП показали, что сорбционная емкость шлама реализуется в течении первых минут контакта со сточной водой (СВ), и через 25 минут достигает 0,35 г/г по бензину, 0,56 г/г по дизельному топливу, 0,7 г/г по турбинному маслу, 1,5 г/г по мазуту и далее не увеличивается, что свидетельствует о наступлении сорбционного равновесия [1].

Влагоемкость шлама составила 57,13 %, плавучесть – 1,2 %. По полученным данным можно судить о том, что шлам без дополнительной обработки имеет невысокую сорбционную емкость и повышенную гидрофильность.

На основе литературных данных отработан способ гидрофобизации поверхности СМ. Изначально для обработки был выбран гидрофобизирующий состав на основе кремнийорганического соединения – полиметилгидридсилоксан ГКЖ–94 М (ТУ 6–02–691–76). Для получения СМ шлам смешивали при объемном и массовом соотношении (0,3–0,6):1 жидкость/шлам с полиметилгидридсилоксаном [2]. Далее полученную смесь термообработывали при температурах от 20 до 400 °С. Для сравнения эффективности полученных СМ проводили определение сорбционной емкости по отношению к нефти [3]. Результаты показаны на рис. 1.

По графикам на рис. 1 установлено, что адсорбционный процесс идет в две стадии: внешнедиффузионный – на протяжении от 2 до 5 минут, внутридиффузионный – от 5 до 25 минут. Скорость сорбции максимальна

при внешнедиффузионном процессе при минимальном времени контакта фаз, в данном случае внутренняя диффузия является лимитирующей стадией. Выявлено, что при увеличении температуры обработки увеличивается скорость сорбции и становится более выраженной стадия внутренней диффузии (графики 3, 4, 5 рис. 1), что говорит об увеличении площади поверхности по всему объему СМ.

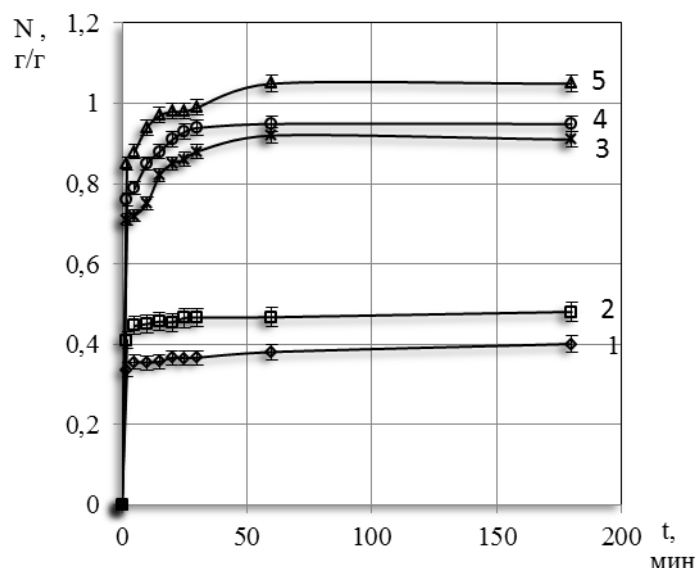


Рис. 1. Сорбционная емкость СМ, модифицированных ГКЖ-94М по отношению к нефти: 1 – исходный шлам; 2 – шлам, обработанный ГКЖ – 94М, без термообработки; 3 – шлам, обработанный ГКЖ – 94М, термообработка при 200 °С; 4 – при 300 °С; 5 – при 400 °С

В насыпных адсорбционных фильтрах время контакта фаз ограничено по времени, поэтому приоритетным будет внешнедиффузионный процесс. Для увеличения скорости сорбции необходимо увеличить площадь поверхности СМ посредством термообработки.

Для сравнения эффективности гидрофобизации проведена обработка карбонатного шлама гидрофобными составами «ГКЖ – 94М», «ГКЖ – 11Н», «Силор», «ЕК WS 100», «NeoMID Влаго STOP Bio», жидкое натриевое стекло. Обработка карбонатного шлама данными кремнийсодержащими реагентами произведена в одинаковых условиях и эмульсиями одинаковых концентраций. Температура обработки составила 400 °С. Измерения проведены весовым методом [4]. Результаты представлены на рис. 2.

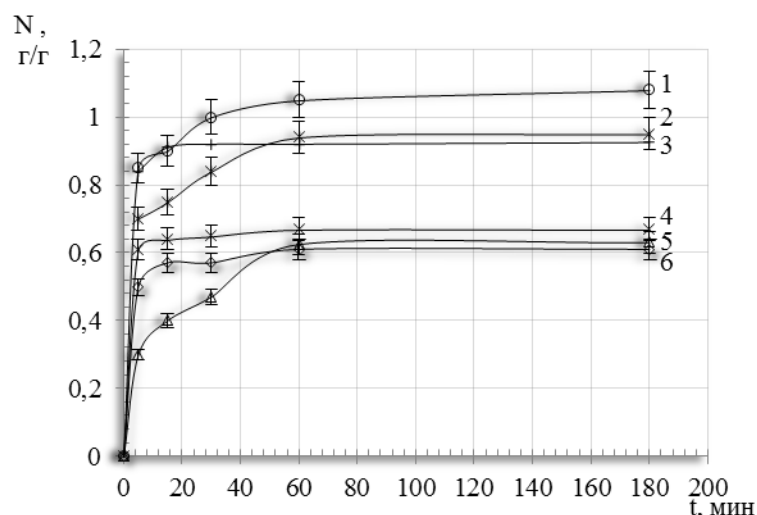


Рис. 2. Адсорбционная емкость шлама, модифицированного разными гидрофобизаторами по отношению к нефти: 1 – ГКЖ – 94М; 2 – ГКЖ – 11Н; 3 – Силор; 4 – WS 100; 5 – NeomidВлагоStop; 6 – Жидкое натриевое стекло

Наиболее эффективным является гидрофобизирующий состав ГКЖ – 94М, СМ, полученный на его основе далее имеет наименование «СМ – 1». СМ–1 имеет максимальную скорость сорбции и сорбционную емкость.

При использовании гидрофобного мелкодисперсного шлама в насыпных фильтрах возникает ряд проблем:

- при фильтровании образуется гидрофобная «пробка», блокирующая поток воды при атмосферном давлении;
- при подаче потока воды на гидрофобный мелкодисперсный шлам под давлением возникает пристеночный эффект течения жидкости.

Избежать этих проблем и использовать максимальную сорбционную емкость СМ в насыпных фильтрах можно за счет уменьшения насыпной плотности, т.е. формирования гранул.

Получены гранулы карбонатного шлама с использованием в качестве связующего жидкого натриевого стекла с последующим окатыванием и термообработкой. Для получения гранул полидисперсный карбонатный шлам с размером фракции от 0,09 до 0,5 мм смешивали с жидким натриевым стеклом при массовом и объемном соотношении 2:1 соответственно. Данное соотношение подобрано экспериментальным путем. Полученные гранулы имеют диаметр частиц от 0,5 до 5 мм, характеризуются прочностью на истирание – 78 %, гидрофильностью, значение рН водной вытяжки щелочной (рН = 10). После промывки значение рН фильтрата изменяется до нейтрального (7,2–7,5). [5].

Для получения гранул, обладающих водоотталкивающими свойствами необходимо провести гидрофобизацию. Исследована объемная и поверхностная гидрофобизация. При объемной – гидрофобизирующий состав вводится в массу материала совместно с пластификатором. При поверхностной – термообработанные гранулы пропитываются эмульсией гидрофобизатора.

Для проведения объемной гидрофобизации готовили эмульсию жидкого натриевого стекла и ГКЖ – 94М в соотношении 1:1 об. Для получения гранул, обладающих водоотталкивающими свойствами, мелкодисперсный шлам (0,01–0,09) мм смешивали со смесью при массовом и объемном соотношении 2:1 до полной пропитки материала. Далее проводили формирование гранул окатыванием. Полученные гранулы подвергали термообработке при 250 °С до установления постоянной массы. Далее СМ помещали в эксикатор, где он охлаждался до комнатной температуры [6]. Полученный СМ имеет аббревиатуру «СМ – 3». Средний размер гранул СМ – 3 составляет от 0,5 до 2,5 мм, прочность на истирание – 65 %, суммарный объем пор – 0,31 см³/г, пористость – 76,3 %, плавучесть – 97,5 %, влагоемкость – 1,6 %.

Экспериментально определены значения сорбционной емкости «СМ – 1», «СМ – 3» по отношению к бензину АИ–92, нефти и выведены для сравнения на рис. 3.

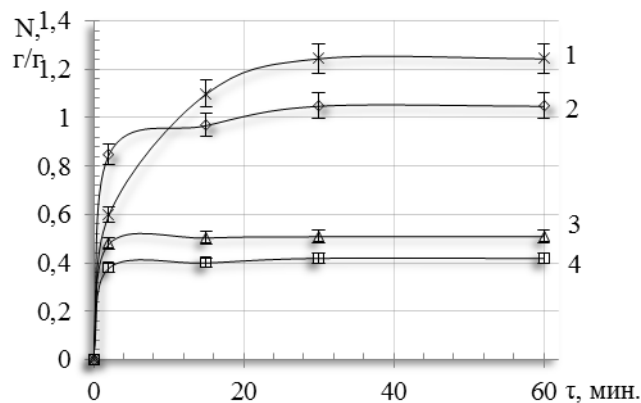


Рис. 3. Адсорбционная емкость «СМ – 1», «СМ – 3» по отношению к бензину и нефти: 1 – Нефть «СМ – 3»; 2 – Нефть «СМ – 1»; 3 – Бензин АИ – 92 «СМ – 3»; 4 – Бензин АИ – 92 «СМ – 1»

Выявлено, что сорбционная емкость «СМ – 3» превышает емкость «СМ – 1» на (15–20) %. Гранулы «СМ – 3» имеют высокую удерживающую способность, так как данный сорбент характеризуется пористой структурой.

Для оценки эффективности «СМ – 3» проведена очистка СВ, загрязненной НП в динамических условиях. Для эксперимента использовалась фильтровальная стеклянная колонка диаметром 2,5 см.

Для эксперимента готовили модельную смесь воды, загрязненной нефтью. Концентрация нефти в модельной смеси составляет $1,35 \text{ мг/дм}^3$. Данная концентрация является средней на входе в адсорбционные фильтры в системах очистки СВ от НП. Высота слоя загрузки составляет 20 см, масса – 54,55 г, скорость фильтрования – 3,5 м/ч. «Проскок» НП фиксируется на концентрации – $0,3 \text{ мг/дм}^3$. На рис. 4 показана кривая сорбции НП СМ – 3 в динамических условиях. В ходе эксперимента определена динамическая и полная обменная емкость (ДОЕ, ПОЕ, мг/г) СМ – 5. ДОЕ – $2,26 \text{ мг/г}$ при объеме пропущенной воды $91,33 \text{ дм}^3$, ПОЕ – $3,18 \text{ мг/г}$ при $128,51 \text{ дм}^3$.

По уравнению Шилова рассчитано время τ и коэффициент K защитного действия слоя «СМ – 3», который составил 53,18 ч и 265 ч/м соответственно.

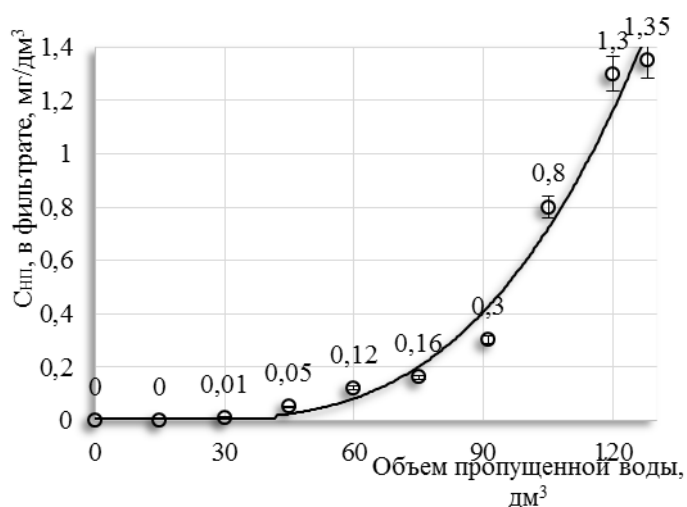


Рис. 4. Кривая сорбции НП СМ – 3 в динамических условиях

Для проведения поверхностной гидрофобизации гранулы шлама обрабатывались эмульсией гидрофобизатора с определенной концентрацией. В качестве гидрофобизаторов использовались ГКЖ – 11н, ГКЖ – 94М, кремнийорганическая жидкость Силор.

Проведено исследование зависимости пористой структуры, суммарного объема пор от температуры обработки гранул шлама. Температура обработки варьировалась от 200 до 800 °С. При температуре термообработки 700 °С достигалось максимальное значение суммарного

объема пор – $0,56 \text{ см}^3/\text{г}$, пористости – 81 %. В результате сорбционная емкость по бензину АИ – 92 достигла $0,7 \text{ г/г}$.

Температура $700 \text{ }^\circ\text{C}$ выбрана оптимальной. При данной температуре происходит полное удаление влаги, в том числе связанной, пиролиз органических веществ, при выделении продуктов разложения образуется развитая пористая структура, происходит увеличение удельной поверхности.

Для придания гидрофобного эффекта при поверхностной обработке гранулы шлама, полученные при $700 \text{ }^\circ\text{C}$, пропитывали водными эмульсиями разных концентраций гидрофобизирующего вещества.

Экспериментальным путем подобраны оптимальные концентрации гидрофобизатора – 5 % – водный раствор ГКЖ – 94М. При нанесении полимера на поверхность с концентрацией пропитки от 5 до 10 % происходило снижение суммарного объема пор на 28 % по сравнению с гранулами без пропитки и далее не снижалось. При пропитывании гранул шлама эмульсией с концентрацией более 10 % суммарный объем пор не изменялся. Это подтверждает то, что избыток гидрофобизатора не остается на поверхности, а переходит в фильтрат [7].

Гранулы пропитывали эмульсией гидрофобизатора и проводили термообработку при $150 \text{ }^\circ\text{C}$ в течение 60 минут. Данный СМ далее обозначается «СМ – 5». Полученный СМ имеет насыпную плотность – $0,536 \text{ г/см}^3$, суммарный объем пор – $0,57 \text{ см}^3/\text{г}$, пористость – 80,72 %, средний размер гранул – (0,5–1,6) мм, прочность на истирание – 68 %, влагоемкость – 0,9 %, плавучесть – 99 %, сорбционная емкость по отношению к бензину АИ-92 – $0,67 \text{ г/г}$.

Проведено определение эффективности очистки в динамических условиях «СМ – 5», моделирующих промышленный адсорбционный фильтр на промышленных предприятиях. Для эксперимента готовили модельную смесь воды, загрязненной нефтью. Концентрация нефти в модельной смеси составляла – $1,35 \text{ мг/дм}^3$. Данная концентрация является средней на входе в адсорбционные фильтры в системах очистки СВ от НП. Высота слоя загрузки составляет 20 см, масса – 54,38 г, скорость фильтрования – 3,5 м/ч. «Проскок» НП фиксируется на концентрации – $0,3 \text{ мг/дм}^3$. На рис. 5 показана кривая сорбции НП «СМ – 5» в динамических условиях. В ходе эксперимента определена ДОЕ, ПОЕ, мг/дм^3 СМ. ДОЕ – $4,2 \text{ мг/г}$ при объеме пропущенной воды $163,62 \text{ дм}^3$, ПОЕ – $5,4 \text{ мг/г}$ при $210,38 \text{ дм}^3$.

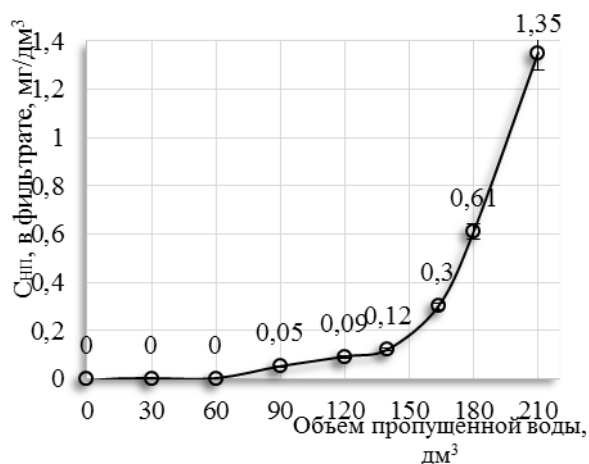


Рис. 5. Кривая сорбции НП СМ–5 в динамических условиях

По уравнению Шилова рассчитано время τ и коэффициент K защитного действия слоя «СМ – 5», который составил 95,28 ч и 476,4 ч/м соответственно.

По полученным экспериментальным данным построена изотерма адсорбции НП из воды с помощью «СМ–5». Выпуклая линия изотермы адсорбции относится к I типу по БЭТ, соответствует изотерме Лэнгмюра L -типа и указывает на наличие в адсорбенте микропор. Изотерма представлена на рис. 6.

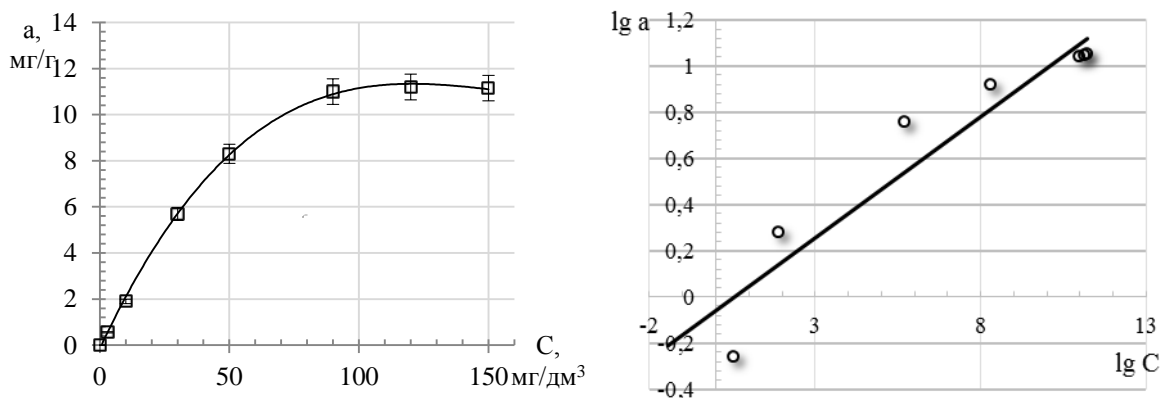


Рис. 6. Изотерма адсорбции «СМ – 5» НП из воды в динамических условиях

Изотерма описывается уравнением Фрейндлиха:

$$\Gamma = 1,09C^{0,105}$$

В результате при сравнении объемной («СМ – 3») и поверхностной («СМ – 5») гидрофобизации можно сделать выводы:

– проведение поверхностной гидрофобизации наиболее экономически выгодно, в 10 раз снижается расход гидрофобизатора;

– суммарный объем пор «СМ – 5» больше суммарного объема пор «СМ – 3» на 45 %, при этом сорбционная емкость увеличивается на 25 % [7].

Таким образом, на основе шлама получены гидрофобные СМ различных фракций, представлены на рис. 7.



Рис. 7. Гидрофобные адсорбенты, полученные на основе шлама:
а – исходный шлам, б – «СМ – 1», в – «СМ – 5», г – «СМ – 3»

После использования в качестве фильтрующей загрузки отработанный модифицированный шлам предполагается не регенерировать, а использовать его в качестве вспомогательного топлива. Теплота сгорания образца «СМ – 1», «СМ – 5» составила 5354,6 ккал/кг и 5411 ккал/кг [8].

Проведены исследования физико–механических свойств укрепленных цементом местных грунтов с добавкой отработанного «СМ – 5», «СМ – 1». Примерный состав отработанных СМ – (0,7–1,2) г НП на 1 г СМ. Отработанный СМ вводится в следующих дозировках: 5, 10, 15, 20 % от массы грунта. Модификация укрепленного грунта с помощью отработанного СМ приводит к росту остаточной прочности после циклов замораживания–оттаивания. Однако, частично прирост обусловлен падением предела прочности на сжатие. Наименьшее падение предела прочности на сжатие и значительный прирост остаточной прочности после циклов замораживания – оттаивания прослеживается при введении добавки отработанного СМ до 10 %. Введение добавки отработанного СМ

в укрепленный глинистый грунт способствует увеличению в 1,4 раза остаточной прочности после 15 циклов попеременного замораживания – оттаивания.

По результатам исследования выявлен положительный эффект от введения замазученного шлама в качестве модификатора в состав укрепленного грунта, заключающийся в росте морозостойкости и предела прочности на растяжение при изгибе.

Заключение

В ходе проделанной работы разработан СМ для доочистки СВ от НП из отхода водоподготовки КТЭЦ-1. Карбонатный шлам повторно используется в цикле промышленных предприятий. Производится экономия средств на закупку дорогостоящих сорбционных материалов.

Список литературы

1. Николаева Л.А., Бородай Е.Н., Голубчиков М.А. Сорбционные свойства шлама осветлителей при очистке сточных вод электростанций от нефтепродуктов // Известия ВУЗов. Проблемы энергетики. – 2011. – № 1–2. – С. 132–137.

2. Способ получения гидрофобного сорбента для очистки природных и сточных вод от нефтепродуктов / Л.А. Николаева, М.А. Голубчиков: пат. 2447935, Рос. Федерация. № 2010144232/05; заявл. 28.10.2010; опубл. 20.04.2012. Бюл. № 11. – 5 с.

3. Николаева Л.А., Голубчиков М.А. Повышение сорбционных свойств шлама осветлителей при очистке сточных вод электростанций от нефтепродуктов // Известия ВУЗов. Проблемы энергетики. – 2011. – № 3–4. – 112–116 с.

4. Николаева Л.А., Голубчиков М.А. Влияние природы гидрофобизатора на сорбционную емкость шлама осветлителей ТЭС // Вода: Химия и экология. – 2011. – № 10. – 54–57 с.

5. Николаева Л.А., Голубчиков М.А. Гранулированный сорбент на основе шлама осветлителей ХВО // VI межд. молод. науч. конф. «Тинчуринские чтения»: Сб. мат. док. – Казань: КГЭУ. – Т. 2. – 2011. – С. 131–132.

6. Способ получения гидрофобного сорбента для очистки природных и сточных вод от нефтепродуктов / Л.А. Николаева, М.А. Голубчиков: пат. 2480277, Рос. Федерация. № 2011151945/05; заявл. 19.12.11; опубл. 27.04.13. Бюл. № 12. – 5 с.

7. Николаева Л.А., Голубчиков М.А., Захарова С.В. Гранулированные гидрофобные адсорбенты на основе карбонатного шлама осветлителей ХВО КТЭЦ-1 для доочистки сточных вод от нефтепродуктов // Энергосбережение и водоподготовка. – 2012. – № 4. – С. 24–30.

8. Николаева Л.А., Голубчиков М.А. Исследование сорбции нефтепродуктов сточных вод электростанций модифицированным шламом осветлителей ТЭС // Теплоэнергетика. – 2012. – № 5. – С. 59 – 62.

NATURAL AND INDUSTRIAL WASTEWATER OIL FROM USING NEW GRANULAR HYDROPHOBIC SORBENTS

L.A. NIKOLAEVA, M.A. GOLUBCHIKOV
FSBEI NPE «Kazan power-engineering university», Kazan

Annotation. Investigated carbonate slurry KТПP-1 as a sorbent of petroleum products. Lacks sludge as sorbent. A series of experiments to improve performance: the sorption capacity for oil products buoyancy. Presents possible ways of disposal of spent sorbent.

Key letters: carbonate slurry oil, sorbents, recycling, pelletizing, hydrophobicity.

СЕКЦИЯ 5 КРУГЛЫЙ СТОЛ. СИСТЕМЫ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ

Председатель: Ваньков Юрий Витальевич

Сопредседатель: Мельников Владимир Михайлович

Секретарь: Зиганшин Шамиль Гаязович

УДК 62.1:006.354

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СХЕМ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ МУНИЦИПАЛЬНЫХ ОБРАЗОВАНИЙ

В.М. МЕЛЬНИКОВ, М.Р. РАЧКОВ

ФГБОУ ВПО «Владимирский государственный университет
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»,
г. Владимир

Аннотация. Схема теплоснабжения должна являться программой решения проблем систем централизованного теплоснабжения на перспективу, давать разумную долю децентрализации. Схема теплоснабжения характеризуется многими показателями, но главных комплексных показателей около десяти. Практика работы с готовыми схемами теплоснабжения показала, что возникает много вопросов при решении конкретных задач. Для исправления неточностей и недоработок схем теплоснабжения необходима публичность её прохождения по этапам разработки.

Ключевые слова: схема теплоснабжения, система централизованного теплоснабжения, комплексные показатели, актуализация схем теплоснабжения, независимый подход.

Решение сложившихся проблем в системах централизованного теплоснабжения с учетом перспективы дальнейшего развития возможно при помощи комплексного системного подхода, который должен быть отражен в Схеме теплоснабжения.

Схема теплоснабжения – документ, содержащий предпроектные материалы обоснования эффективного и безопасного функционирования системы теплоснабжения, её развития с учетом правового регулирования в области энергосбережения и повышения энергетической эффективности [1].

Опыт разработки реальных схем теплоснабжения в течение пяти последних лет дал определённые знания и богатый фактический материал, элементы сравнительного анализа с другими авторами и авторскими коллективами.

Схема теплоснабжения характеризуется многими показателями, но одними из главных комплексных показателей, как показала практика, являются:

1. Формирование точного перечня всех источников тепловой энергии поселения, тепловых сетей;
2. Систематизация технических характеристик и других данных об источниках тепла, тепловых сетях;
3. Выявление основных проблем, присущих источникам тепловой энергии и тепловым сетям в каждом конкретном районе поселения;
4. Назначение единой теплоснабжающей организации;
5. Определение радиуса эффективного теплоснабжения источника тепловой энергии;
6. Составление списка мероприятий по реконструкции источников и тепловых сетей;
7. Определение возможности подключения новых объектов капитального строительства к сетям теплоснабжения.

Рассмотрим составляющие и возможности совершенствования каждого из комплексных показателей.

1. Формирование точного перечня всех источников тепловой энергии поселения, тепловых сетей формально не вызывает трудности при наличии доброй воли теплоснабжающих организаций и определённого административного ресурса. Но в большинстве случаев теплоснабжающие организации дают отрывочно-убогую информацию, часто лишённую наличия определённой системы. Это сложившаяся практика, усиливающаяся при движении от крупных городов к малым, провинциальным городам и посёлкам различной степени подчинённости.

2. Систематизация технических характеристик и других данных об этих источниках, тепловых сетях может быть проведена по методике [2], охватывающей основные параметры источников тепла и тепловых сетей, но нуждающаяся в дополнениях и дальнейшем развитии.

Попыткой развить подобные показатели можно считать работу [3], где на примере небольших городских поселений Вязниковского района Владимирской области произведена оценка состояния систем централизованного теплоснабжения. Основными показателями систематизации можно считать следующие: установленная мощность

(Гкал/ч); располагаемая мощность (Гкал/ч); подключенная нагрузка (Гкал/ч); удельная материальная характеристика тепловой сети ($\text{м}\cdot\text{м}/(\text{Гкал}/\text{ч})$); удельная длина тепловой сети ($\text{м}/(\text{Гкал}/\text{ч})$); теплоплотность района ($\text{Гкал}/\text{ч}/\text{тыс. га}$); удельная тепловая нагрузка ($\text{Гкал}/\text{ч}/\text{км}$) [4].

Необходимо отметить, что указанные выше показатели являются сугубо техническими и не полностью отражают эксплуатационные характеристики рассматриваемой системы теплоснабжения. Здесь необходимо провести разделение системы теплоснабжения на её составляющие (источник тепловой энергии, тепловая сеть, потребитель тепловой энергии) и ввести характерные параметры для каждого звена. Необходимость изучения системы теплоснабжения как совокупности трех слагаемых обусловлена возможными различиями в эксплуатационных характеристиках этих слагаемых: на новую тепловую сеть может работать выработавшая свой ресурс котельная и наоборот.

Анализ представленных в открытом доступе методик определения эксплуатационных свойств систем теплоснабжения [7, 8] показал различные вариации последних. При этом необходимо отметить, что каждая методика делает упор на какой определенный параметр или совокупность параметров, что, на наш взгляд, ставит под сомнение достоверность результата – рассматриваемые параметры могли бы быть сгруппированы по ряду признаков (технические, эксплуатационные, экономические, потребительские и т.д.), но необходимо провести сложную работу по соотношению этих параметров между собой.

Отдельно стоит обратить внимание на необходимость проведения сравнения различных систем теплоснабжения между собой, но относительно территорий и условий, в которых они расположены. Так, например, могут быть выявлены системы, имеющие лучшие эксплуатационные характеристики в одном городе или районе и проведено их сравнение с системами, имеющими те же характеристики, но расположенные в другом городе.

В совокупности эти параметры позволят составить подробную картину эксплуатационных свойств систем теплоснабжения, а также будут являться обоснованием для определения перечня мероприятий, необходимых для улучшения показателей их работы. Только после определения данных параметров станет возможным дать компетентную оценку работе системы.

3. Выявление основных проблем, присущих источникам тепловой энергии, тепловым сетям и теплопотребляющим установкам в каждом конкретном районе поселения происходит при совместной работе

с администрацией и теплоснабжающими организациями. Чаще всего такими проблемами являются:

- повышенный износ котельного и насосного оборудования;
- отсутствие диспетчеризации;
- отсутствие резервного топлива;
- низкое качество сетевой воды, вызванное отсутствием химводоподготовки;
- низкая надежность и высокий износ тепловых сетей;
- неудовлетворительное состояние опор и сооружений на тепловых сетях;
- низкое качество изоляции или её полное отсутствие на отдельных участках;
- гидравлическая разбалансировка тепловых сетей;
- отсутствие приборов учета тепловой энергии;
- устаревшее оборудование центральных и индивидуальных тепловых пунктов;
- несогласованные изменения в конструкциях теплопотребляющих установок, присоединенным к тепловым сетям;
- несоответствие режимов работы теплопотребляющих установок расчетным;
- высокие тарифы на тепловую энергию;
- монополизм на рынке услуг по теплоснабжению.

4. Монополизм на рынке услуг по теплоснабжению порождает проблему назначения единой теплоснабжающей организации. Или наоборот – единая теплоснабжающая организация становится автоматически монополистом по продаже тепловой энергии. И наиболее острые моменты по теплоснабжению населения, где неоправданно завышенные и необоснованные тарифы практически снижают материальный уровень большинства. Принятие и утверждение схем теплоснабжения нередко перерастает в жёсткие схватки между теплоснабжающими организациями и разработчиками схем. Схема в конечном итоге принимается, но чаще за счёт компромиссов со стороны разработчиков.

5. Определение радиуса эффективного теплоснабжения источника тепловой энергии введено Федеральным законом №190-ФЗ «О теплоснабжении».

Радиус эффективного теплоснабжения – максимальное расстояние от теплопотребляющей установки до ближайшего источника тепловой энергии в системе теплоснабжения, при превышении которого

подключение теплотребляющей установки к данной системе теплоснабжения нецелесообразно по причине увеличения совокупных расходов в системе теплоснабжения [4].

Радиус эффективного теплоснабжения обозначает границы оптимальной зоны действия конкретной системы теплоснабжения и определяет условия, по которым выносятся решение о возможности подключения новых потребителей к тепловой сети.

Средний радиус теплоснабжения есть средняя удаленность потребителей от источника тепловой энергии (расстояние от источника до центра тяжести тепловых нагрузок всех потребителей). Средний радиус теплоснабжения не учитывает конфигурацию тепловой сети, а только удаленность потребителя от источника. Поэтому в случае, если трасса тепловой сети известна, расчет оборота тепла производится с учетом реальных длин участков. Отношение реального оборота тепла к теоретическому называется коэффициентом конфигурации тепловых сетей и дает возможность оценить оптимальность выбора трассы.

Максимальный радиус теплоснабжения – расстояние от точки подключения теплотребляющей установки самого удаленного потребителя (по вектору или с учетом конфигурации трассы).

Оптимальный радиус теплоснабжения – расстояние, при котором удельные затраты на выработку и транспорт тепла от одной теплоэлектроцентрали являются минимальными.

Впервые это понятие было использовано Е.Я. Соколовым в «Нормах по проектированию тепловых сетей» (1938 г.), там же приведены основные расчетные зависимости для его определения.

Е.Я. Соколов предлагал определять оптимальный радиус теплоснабжения из расчета минимума удельных стоимостей строительства тепловых сетей и источника теплоснабжения:

$$S = A + Z \rightarrow \min . \quad (1)$$

где A – удельная стоимость строительства тепловой сети, руб./(Γ кал/ч); Z – удельная стоимость строительства источника тепловой энергии, руб./(Γ кал/ч).

Оптимальный радиус теплоснабжения, использованный Е.Я. Соколовым, является аналогом «современного» радиуса эффективного теплоснабжения, введенного федеральным законом № 190-ФЗ «О теплоснабжении»: определяет максимальное расстояние, при котором транспорт теплоты от источника потребителям еще считается эффективным.

Принятые нормативные документы, требующие расчета радиуса эффективного теплоснабжения для всех источников тепловой энергии, не содержат методик и рекомендаций по его определению.

Методика Е.Я. Соколова содержит на сегодняшний день единственное аналитическое выражение для определения радиуса эффективного теплоснабжения. Основными расчетными параметрами здесь выступают стоимость тепловой сети, материальная характеристика, мощность источника тепловой энергии, расчетный перепад температур теплоносителя, площадь теплового района, а также эмпирический коэффициент φ , зависящий от постоянной части расходов на строительство источника. Часть указанных параметров – стоимость тепловой сети и эмпирический коэффициент φ – сугубо экономические величины, изменяющиеся со временем. Рассматриваемая же методика основана на экономике 1938-х гг. и «закрытых» эмпирических соотношениях и коэффициентах. Поэтому обоснованность применения указанных аналитических выражений так же остается под вопросом.

6. Составление списка мероприятий по реконструкции источников и тепловых сетей целиком основывается на предыдущих пунктах 1, 2, 3 и является их логическим продолжением с учетом генерального плана территории и других документов, например программ энергосбережения, программ комплексного развития и др. Безусловно, все программы, принятые для определённого территориального образования, должны не переписывать друг друга, а взаимно дополнять и подчиняться единой цели – улучшения жизненного уровня, прежде всего, населения [5].

7. Определение возможности подключения новых объектов капитального строительства к сетям теплоснабжения обосновывается в первую очередь на генеральном плане развития с учётом возможных вариантов прогнозирования и элементов теории рисков [6].

Практика работы с готовыми схемами теплоснабжения показала, что возникает много вопросов при решении конкретных задач. Например:

- учёт перспективных нагрузок приводит к значительному завышению диаметров тепловых сетей, что требует проверки таких прогнозов;

- рекомендуемые температурные графики явно не соответствуют реальной ситуации, что также требует проверки;

- расчёт оптимального радиуса теплоснабжения часто не приводится или приводится некорректно, т.е. без объяснений;

– часто отсутствуют сведения о гидравлическом режиме сетей даже при наличии электронной модели, объяснения и рекомендации сведены к минимуму;

– схема теплоснабжения для публичного доступа (сайт администрации) может отсутствовать или дана в крайне урезанном виде.

Для исправления неточностей и недоработок схем теплоснабжения необходима прежде всего публичность её прохождения по этапам разработки. Выполнение схемы и её актуализация необходимо поручать специалистам незаинтересованных организаций. Схемы, выполненные эксплуатирующими организациями, напоминают отчёт о проделанной работе, скрывают невыгодную информацию и направлены на укрепление монополии в данной отрасли.

Список литературы

1. Постановление Правительства Российской Федерации от 22 февраля 2012 г. №154 «О требованиях к схемам теплоснабжения, порядку их разработки и утверждения».

2. Мельников В.М., Курникова А.А., Рачков М.Р. Проблемы централизованного теплоснабжения малых населенных пунктов // Главный энергетик. – 2013. – № 6.

3. Папушкин В.Н. Радиус теплоснабжения. Хорошо забытое старое // Новости теплоснабжения – 2010. – № 9 – С. 44–49.

4. Тарасенко В.И., Мельников В.М., Курникова А.А., Рачков М.Р. Дорогое наше тепло // Технологии интеллектуального строительства: науч.-техн. и производ. журнал. – М., 2014. – № 1. – С. 40–43.

5. Тарасенко В.И., Мельников В.М., Курникова А.А., Рачков М.Р. Централизованное теплоснабжение от теории к экономии // Технологии интеллектуального строительства: науч.-техн. и производ. журнал. – М., 2014. – № 2. – С. 62–65.

6. Колыхаева Ю.А., Филюшина К.Э. Комплексная оценка эффективности функционирования системы теплоснабжения // Проблемы современной экономики: науч. Журнал. – Махачкала, 2012. – № 1. – С. 322–325.

7. Кузник И.В. Оценка эффективности транспортирования тепловой энергии // Энергосбережение: Науч. журнал. – М., 2011. – № 3. – С. 42–47.

IMPROVEMENT OF HEAT SUPPLY SCHEMES MUNICIPALITIES

V.M. MELNIKOV, M.R. RACHKOV

Federal STATE budgetary educational institution of higher professional education «Vladimir state University named after Alexander Grigorievich and Nikolai Grigorievich Stoletovs», Vladimir

Annotation. The scheme of heat supply should be the program of solving the problems of district heating systems for the future, to give a reasonable fraction of decentralization. The heat supply circuit is characterized by many indicators, but the main integrated indicators about ten. The practice of working with a ready supply schemes has shown that there are many questions to solve specific tasks. To correct inaccuracies and flaws of circuits of a heat supply the necessary publicity of its passage through the stages of development.

Key letters: words scheme of a heat supply, centralized heating system, integrated indicators, updating heating schemes, independent approach.

УДК 697.34:697.317.4

МЕТОДИКА ПРОЕКТИРОВАНИЯ ИНДИВИДУАЛЬНОГО ТЕПЛОВОГО ПУНКТА ОБЩЕСТВЕННОГО ЗДАНИЯ

В.М. МЕЛЬНИКОВ*, М.В. ПУРИМ**

*ФГБОУ ВПО «Владимирский государственный университет имени
Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»,
г. Владимир

**ООО «Группа Компаний Ника-Премьер», г. Москва

Аннотация. Методика проектирования индивидуального теплового пункта (ИТП) основана на многолетней практике и может быть рекомендована для жилых, административных и производственных зданий. Опора на известные, апробированные формулы и закономерности, следование нормативным и руководящим документам. Комплектация узлов ИТП обоснована, используется надёжная продукция, отсутствует жёсткая привязка к определённым технологиям и изготовителям. Существует перспектива моделирования процессов в ИТП и их дальнейшая оптимизация.

Ключевые слова: методика проектирования индивидуального теплового пункта, известные формулы и закономерности, применяется надёжная продукция, проверка практикой, моделирования процессов, оптимизация.

Тепловые пункты являются важным составляющим звеном системы централизованного теплоснабжения. В СП 124.13330.2012 Свод правил. Тепловые сети даются следующие определения, определяющие функции устройств: тепловой пункт, индивидуальный тепловой пункт (ИТП), центральный тепловой пункт (ЦТП), автоматизированный узел управления (АУУ) и узел ввода [1]. В этом же нормативном документе, в разделе 14 «Тепловые пункты» указаны основные указания по расположению, компоновке и комплектации, которые необходимы при проектировании и дальнейшей эксплуатации.

Свод Правил «Проектирование тепловых пунктов» [2] формально является основным нормативным документом по проектированию тепловых пунктов, но фактически тепловые пункты проектируются или приобретаются готовыми в блочном исполнении. При самостоятельном проектировании используется наработанный годами опыт в совокупности

с современными публикациями, из которых выделяется монография Пыркова В.В. [3]. Проектировщики со стажем не спешат выдавать свои приёмы и секреты, но необходимость делиться знаниями объективна и закономерна. В предыдущих публикациях были сделаны попытки систематизировать уже накопленный опыт [4], [5].

В настоящей статье предлагается методика проектировочного расчёта ИТП общественного здания. Объект показателен наличием всех видов тепловой нагрузки (отопление, вентиляция, горячее водоснабжение и технологическая (бассейн)). Суммарная нагрузка составляет 3,6 Гкал/ч, из них вентиляция составляет 2,215 Гкал/ч, остальная примерно в равных долях. Такой объект характерен для современной городской застройки и подключается, как правило, к системе централизованного теплоснабжения.

В качестве исходной информации представляется анкета ИТП, включающая в себя два основных блока:

1. Исходные данные для проектирования ИТП (подбора основного оборудования)

2. Документация, передаваемая Заказчиком Исполнителю помимо перечисленных исходных данных для проектирования теплового пункта п. 1.

Блок 1 содержит:

1.1. Нагрузки подключаемых систем потребления тепловой энергии, Гкал/ч.

1.2. Давление и располагаемый напор в тепловой сети на вводе в обслуживаемое здание (минимальные и максимальные значения в случае изменений), кгс/см².

1.3. Температурный график тепловых сетей, °С.

1.4. Температурные графики систем потребления тепловой энергии обслуживаемого здания и количество систем.

1.5. Потери давления при циркуляции расчетных расходов во внутренних контурах систем потребления тепловой энергии обслуживаемого здания.

1.6. Отметка наивысшей точки систем потребления тепловой энергии.

1.7. Объем внутренних контуров систем потребления тепловой энергии при их независимом подключении.

1.8. Рабочее давление приборов.

1.9. Минимальное давление в системе ХВС на вводе в тепловой пункт при закрытом подключении системы ГВС.

1.10. Расчетный циркуляционный расход в системе ГВС.

1.11. Располагаемые параметры электроснабжения.

1.12. Требования по автоматизации теплового пункта.

1.13. Размещение приборов учета.

1.14. Наличие системы диспетчеризации.

Блок 2 содержит:

2.1. Технические условия ОАО «МОЭК».

2.2. Условия подключения ОАО «МОЭК».

2.2.1. Ситуационный план в М 1:2000 к ТУ и УП ОАО «МОЭК».

2.3. Технические условия ОАО «Мосводоканал» (давление ХВС на вводе в здание).

2.4. Технические условия ГУП «Мосводосток» (водоотведение из приемка ИТП).

2.5. Технические условия Московской электросетевой компании на присоединение электрической нагрузки ИТП.

2.6. Архитектурно-строительные чертежи присоединяемого проектируемого здания или паспорт БТИ (для существующих зданий) с указанием помещения ИТП.

2.7. Стройгенплан на основной период для проектируемых зданий и строений, либо геоподоснова для существующих зданий с «захватом» питающих здание инженерных коммуникаций.

2.8. Письма и иные документы по требованию Исполнителя для предоставления в ОАО «МОЭК» для согласования проектной документации теплового пункта.

2.9. Для согласования рабочего проекта (рабочей документации) теплового пункта в ОАО «МОЭК» требуется предоставление рабочих проектов внутренних систем потребления тепловой энергии.

В заключение проектирования составляется паспорт теплового пункта, включающий основные разделы:

Общие данные; тепловые нагрузки; трубопроводы и арматура; насосы; водоподогреватели; средства измерений; характеристика теплопотребляющих систем.

Расчёт производится в следующей последовательности:

1. Гидравлический расчет вводной теплотрассы и ИТП

1.1. Расчетное определение диаметра вводной теплотрассы

Исходные данные для расчета:

1. Тепловые нагрузки.

2. Схема присоединения внутренних систем теплопотребления.

3. Температурный график по подающим трубопроводам на внутренние системы теплопотребления (отопление и вентиляция, технология (бассейн)).

4. Источник теплоснабжения.

5. Подача тепла на отопление и вентиляцию после ИТП по отдельным трубопроводам.

1.2. Гидравлический расчет трубопроводов.

2. Расчет тепловой схемы ИТП и проверка основного оборудования

2.1. Расчетные расходы теплоносителя для выбора регулирующих клапанов.

2.1.1. Расчетный расход теплоносителя для выбора регулирующего клапана технологии (бассейн).

2.1.2. Расчетный расход теплоносителя для выбора регулирующего клапана вентиляции.

2.1.3. Расчетный расход теплоносителя для выбора регулирующего клапана отопления.

2.1.4. Расчетный расход теплоносителя для выбора регулирующего клапана ГВС II ступени.

2.2. Расчет и подбор расширительного бака системы технологии (бассейн).

2.2.1. Определяется коэффициент расширения жидкости (прирост объема, %) при ее нагреве (охлаждении) от 10 °С (принимается, что система заполняется при температуре 10 °С). Коэффициент расширения берется из диаграммы, где температурное расширение воды в % при ее нагреве (охлаждении) от 10 °С до средней температуры системы.

2.2.2. Определяется объем расширения – объем жидкости, вытесняющий из системы при ее нагреве от 10 °С до средней температуры системы.

2.2.3. Определяется коэффициент заполнения расширительного бака (коэффициент эффективности) при заданных условиях работы, который показывает максимальный объем жидкости (в процентах от полного объема расширительного бака), который может вместить бак. Все давления абсолютные.

2.2.4. Определяется требуемый полный объем расширительного бака технологии (бассейн).

2.2.5. Выбирается модель расширительного бака с округлением в сторону ближайшего целого.

2.3. Расчет и подбор расширительного бака системы вентиляции (выполняется аналогично п. 2.2).

2.4. Расчет и подбор расширительного бака системы отопления (выполняется аналогично п. 2.2).

2.5. Определение гидравлических сопротивлений элементов тепловой схемы

Краны шаровые, тип Jip-FF Ду различные; клапаны обратные Danfoss тип 802; клапаны предохранительные НЕМЕН тип Si2501; грязевик абонентский Ду125; прочие элементы - внезапное сужение, тройник, ферромагнитный механический фильтр, первичный преобразователь расхода, отвод.

2.6. Подбор (расчет) регулирующего клапана технологии (бассейн)

Исходные данные для расчета

– клапан устанавливается на подающем трубопроводе перед подогревателем технологии (бассейн) (независимая схема присоединения системы технологии).

– теплоноситель – вода с температурой $T_1 = 150$ °С и давлением насыщенных паров.

– избыточное давление теплоносителя перед клапаном.

– предварительно заданный перепад давлений на регулирующем клапане (при полностью открытом клапане).

– расчетный расход теплоносителя.

Решение

2.6.1. Рассчитывается требуемая пропускная способность клапана

2.6.2. По каталогу Danfoss «Регулирующие клапаны и электрические приводы» предварительно принимаем клапан VB2: Ду32 мм с, коэффициент начала кавитации $z = 0,55$.

2.6.3. Рассчитываем перепад давлений на полностью открытом клапане.

2.6.4. Рассчитываем предельно-допустимый перепад давлений на клапане с запасом 10 %.

2.6.5. Проверяем условие кавитации.

2.7. Подбор (расчет) регулирующего клапана вентиляции (аналогично).

2.8. Подбор (расчет) регулирующего клапана отопления (аналогично).

2.9. Подбор (расчет) регулирующего клапана системы горячего водоснабжения (аналогично).

2.10. Подбор (расчет) балансировочного клапана технологии (бассейн)

– клапан устанавливается на обратном трубопроводе системы технологии (бассейн);

– перепад давления на клапане:

– расчетный расход теплоносителя.

Решение

Рассчитываем требуемую пропускную способность клапана:

По каталогу Danfoss «Балансировочные клапаны» выбираем клапан Leno MSV-BD: Ду32 мм, настройка клапана 4,3.

2.11. Подбор (расчет) балансировочного клапана вентиляции

2.12. Подбор (расчет) балансировочного клапана отопления

2.13. Подбор (расчет) клапана подпитки для отопления

– клапан устанавливается на подпиточном трубопроводе системы отопления;

– предварительно заданный перепад давлений на регулирующем клапане (при полностью открытом клапане);

– расчетный расход теплоносителя.

Решение

2.13.1. Рассчитываем требуемую пропускную способность клапана.

В качестве подпиточного клапана используется нормально закрытый соленоидный (электромагнитный) клапан типа EV220 15B: Ду15 мм.

2.13.2. По аналогии с п.1.13.2 рассчитываем требуемое минимальное статическое давление в системе для ее заполнения и обеспечения нескипания теплоносителя:

2.13.3. Минимальное давление перед подпиточным клапаном:

2.14. Определение параметров для расчета водоподогревателей.

2.14.1. Определение параметров для расчета водоподогревателя технологии (бассейн).

2.14.1.1. Температуру нагреваемой воды следует принимать:

– на входе в водоподогреватель: – равной температуре воды в обратном трубопроводе системы отопления при температуре наружного воздуха.

– на выходе из водоподогревателя: – равной температуре воды в подающем трубопроводе тепловых сетей за ЦТП или в подающем трубопроводе системы вентиляции при установке водо-подогревателей в ЦТП при температуре наружного воздуха °С и с учетом технического задания Заказчика (°).

2.14.1.2. Температуру греющей воды следует принимать:

– на входе в водоподогреватель: – равной температуре воды в подающем трубопроводе тепловой сети на вводе в тепловой пункт при температуре наружного воздуха °С (°С);

– на выходе из водоподогревателя: – на 5–10 °С выше температуры воды в обратном трубопроводе системы отопления при расчетной температуре наружного воздуха °С (°С).

2.14.1.3. Расчетные расходы воды следует определять для греющей и нагреваемой воды.

2.14.1.4. Температурный напор водоподогревателя технологии.

2.14.2. Определение параметров для расчета водоподогревателя вентиляции.

2.14.2.1. Температуру нагреваемой воды следует принимать:

– на входе в водоподогреватель: – равной температуре воды в обратном трубопроводе системы отопления при температуре наружного воздуха.

– на выходе из водоподогревателя: – равной температуре воды в подающем трубопроводе тепловых сетей за ЦТП или в подающем трубопроводе системы вентиляции при установке водоподогревателей в ЦТП при температуре наружного воздуха °С и с учетом технического задания Заказчика.

2.14.2.2. Температуру греющей воды следует принимать:

– на входе в водоподогреватель: – равной температуре воды в подающем трубопроводе тепловой сети на вводе в тепловой пункт при температуре наружного воздуха;

– на выходе из водоподогревателя: – на 5–10 °С выше температуры воды в обратном трубопроводе системы отопления при расчетной температуре наружного воздуха.

2.14.2.3. Расчетные расходы воды следует определять по формулам.

2.14.2.4. Температурный напор водоподогревателя вентиляции.

2.14.3. Определение параметров для расчета водоподогревателя отопления.

2.14.3.1. Температуру нагреваемой воды следует принимать:

– на входе в водоподогреватель: – равной температуре воды в обратном трубопроводе системы отопления при температуре наружного воздуха;

– на выходе из водоподогревателя: – равной температуре воды в подающем трубопроводе тепловых сетей за ЦТП или в подающем трубопроводе системы отопления при установке водоподогревателей в ЦТП при температуре наружного воздуха и с учетом технического задания Заказчика.

2.14.3.2. Температуру греющей воды следует принимать:

– на входе в водоподогреватель: – равной температуре воды в подающем трубопроводе тепловой сети на вводе в тепловой пункт при температуре наружного воздуха;

– на выходе из водоподогревателя: – на 5–10 °С выше температуры воды в обратном трубопроводе системы отопления при расчетной температуре наружного воздуха.

2.14.3.3. Расчетные расходы воды следует определять по формулам.

2.14.3.4. Температурный напор водоподогревателя отопления.

2.14.4. Определение параметров для расчета водоподогревателя горячего водоснабжения, присоединенного по двухступенчатой схеме

2.14.4.1. Температуру нагреваемой воды следует принимать:

На входе в водоподогреватель – равной 5 °С, если отсутствует эксплуатационные данные; на выходе из водоподогревателя °С.

2.14.4.2. Температуру греющей воды следует принимать:

– на входе в водонагреватель: равной температуре воды в подающем трубопроводе тепловой сети на вводе в тепловой пункт при температуре наружного воздуха в точке излома графика температур воды;

– на выходе из водоподогревателя.

2.14.4.3. Расчетные расходы воды для расчета водоподогревателя горячего водоснабжения.

Распределение расчетной тепловой производительности водоподогревателей между I и II ступенями осуществляется исходя из условия, что нагреваемая вода во II ступени догревается до температуры °С, а в I ступени – до температуры, определяемой технико-экономическим расчетом или принимаемой на 5°С менее температуры сетевой воды в обратном трубопроводе в точке излома графика.

Расчетная тепловая производительность водоподогревателей I и II ступеней, определяется по формулам.

Максимальный расход нагреваемой воды, проходящей через I и II ступени водоподогревателя, следует рассчитывать исходя из максимального теплового потока на горячее водоснабжение и нагрева воды до 60 °С во II ступени:

2.14.4.4. Температура греющей воды на выходе из водоподогревателя II ступени

2.14.4.5. При наличии в тепловом пункте независимых и зависимых схем расчет температуры греющей воды на входе в водоподогреватель I ступени определяется как температура смеси:

2.14.4.6. Температура греющей воды на выходе из водоподогревателя I ступени:

2.14.4.7. Температурный напор водоподогревателя горячего водоснабжения:

Гидравлические сопротивления по греющей стороне согласно данным завода-изготовителя «Теплотекс АПВ»:

2.15. Подбор (расчет) регулятора перепада давлений (РПД)

2.15.1. Задача: требуется подобрать клапан, предварительно установленный на подающем трубопроводе – регулятор AVR для обеспечения постоянного перепада давлений на каждом из моторных клапанов, в общем (едином) узле согласований давлений.

Исходные данные

– расход теплоносителя,

2.15.2. Произведем расчеты гидравлических потерь по всем возможным «кольцам» тепловой схемы с целью выявления наиболее и наименее гидравлических наружных из них:

– «кольцо» по последовательной схеме (системы ГВС (I и II ступеней) и отопление);

– «кольцо» по последовательной схеме (системы ГВС (I ступени) и отопление);

– «кольцо» по последовательной схеме (системы ГВС (I и II ступеней));

– «кольцо» вентиляции и системы ГВС (I ступени);

– «кольцо» технологии (бассейн) и системы ГВС (I ступени).

2.15.2.1. «Кольцо» по последовательной схеме (системы ГВС (I и II ступеней) и отопление):

2.15.2.2. «Кольцо» по последовательной схеме (системы ГВС (I ступени) и отопление):

2.15.2.3. «Кольцо» по последовательной схеме (системы ГВС (I и II ступеней));

2.15.2.4. «Кольцо» вентиляции и системы ГВС (I ступени):

2.15.2.5. «Кольцо» технологии (бассейн) и системы ГВС (I ступени):

2.15.3. Выбираем клапан РПД из условия наличия перепада давлений на полностью открытом клапане при минимальном перепаде давлений на входе в ЦТП.

Исходные данные

2.16. Подбор циркуляционных насосов

При выборе циркуляционного насоса при независимом подключении систем следует принимать:

– подачу насоса – по расчетному расходу воды в данной системе;

– напор – по сумме потерь давления в компонентах и трубопроводах теплового пункта и в линии циркуляции, которые составляют:

- потери давления в секционных узлах при расчетном циркуляционном расходе;

- потери давления в теплообменнике по нагреваемой стороне;

- прочие потери давления: на трение в трубопроводах, запорная арматура, обратный клапан, фильтр, запас и прочее.

2.16.1. Подбор циркуляционного насоса технологии (бассейн):

- подача насоса;

- напор:

2.16.2. Подбор циркуляционного насоса вентиляции:

В качестве теплоносителя используется пропиленгликоль 40 %.

2.16.3. Подбор циркуляционного насоса отопления

2.16.4. Подбор циркуляционного насоса ГВС

Подбор насоса циркуляции ГВС производится по расчетным данным: расход на циркуляцию и потери в циркуляционном кольце (безотносительно к статической высоте системы ГВС).

2.16.4.1. Расход – определяется по расчетному циркуляционному расходу воды в данной системе, взятому из технического задания или анкеты абонента:

В соответствии с «Методикой определения максимальных и минимальных расходов теплоносителя и воды на тепловых пунктах при выборе тепло и водосчетчиков» от 18.11.1997 г., максимальный расход воды в циркуляционном трубопроводе системы ГВС с учетом возможного на практике увеличения циркуляции из-за запаса в подборе циркуляционных насосов следует принимать в 1,5 раза больше расчетного циркуляционного расхода.

Минимальный расход воды в циркуляционном трубопроводе системы ГВС следует принимать исходя из возможного его снижения при максимальном водозаборе до 40% от расчетного.

2.16.4.2. Напор – по сумме потерь давления в компонентах и трубопроводах теплового пункта и в линии циркуляции, которые составляют:

- потери давления в секционных узлах при расчетном циркуляционном расходе;

- потери давления в циркуляционном кольце трубопроводов системы при циркуляционном расходе;

- потери давления в теплообменнике по нагреваемой стороне;

- прочие потери давления: на трение в трубопроводах, запорная арматура, обратный клапан, фильтр, запас и прочее.

2.17. Подбор насосов заполнения.

При выборе насосов заполнения следует принимать:

– подачу насосов заполнения: исходя из времени заполнения системы – 3 часа для систем объёмом до 10 м^3 ; 6 часов для систем объёмом до 30 м^3 .

– производительность насосов заполнения не должна превышать $5 \text{ м}^3/\text{ч}$.

– напор насосов заполнения определяется как разность между статическим давлением (верхней отметкой присоединенных систем) и минимальным давлением в обратном трубопроводе тепловых сетей в соответствии с техническими условиями теплоснабжающей организации.

Подача насосов принимается в размере 20 % объема теплоносителя независимой системы.

Требуемое минимальное статическое давление в системе для ее заполнения и обеспечения невоскипания теплоносителя рассчитывается по формуле:

2.17.1. Подбор насоса заполнения технологии (бассейн)

2.17.2. Подбор насоса заполнения вентиляции

2.17.3. Подбор насоса заполнения отопления

2.18. Расчет и подбор бака подпитки системы вентиляции

Теплоносителем является пропиленгликоль 40 %. Определяется требуемый полный объем бака подпитки системы вентиляции исходя из условия наполненности бака в течение суток.

Вышеизложенная методика расчёта ИТП общественного здания характеризуется следующим:

1. Базирование на известные, апробированные формулы и закономерности.

2. Строгое следование нормативным и руководящим документам.

3. Применение каждого элемента и узла ИТП обосновано и логически связано.

4. Используется продукция известных и хорошо зарекомендовавших себя фирм.

5. Отсутствует жёсткая привязка к определённым технологиям и изготовителям, применяются надёжные изделия.

6. Данная методика применяется в течение нескольких лет при строительстве и реконструкции тепловых пунктов г. Москва и в Подмосковье.

7. Структурность, последовательность, прозрачность и частичная повторяемость расчётных циклов является основанием для моделирования процессов в ИТП и их дальнейшей оптимизации.

Список литературы

1. СП 124.13330.2012. Свод правил. Тепловые сети. Актуализированная редакция СНиП 41-02-2003. – М.: Стройиздат, 2012. – 78 с.
2. СП 41-101-95. Свод правил. Проектирование тепловых пунктов. – М.: Стройиздат, 1996. – 71 с.
3. Пырков В.В. Современные тепловые пункты // Автоматика и регулирование. – К.: «Такі справи», 2007. – 252 с.
4. Мельников В.М., Пурим М.В. Методика проектировочного расчёта индивидуального теплового пункта // Материалы международной научно-технической конференции. – Владимир, 2013. – С. 190–194.
5. Мельников В.М., Пурим М.В., Карев Д.С. Методика проектирования современного теплового пункта // Главный энергетик. – 2014. – № 7. С. 30–39.

THE DESIGN PROCEDURE OF AN INDIVIDUAL HEATING UNIT PUBLIC BUILDINGS

V.M. MELNIKOV*, M.V. PURIM**

*Federal STATE budgetary educational institution of higher professional education «Vladimir state University named after Alexander Grigorievich and Nikolai Grigorievich Stoletovs», Vladimir

**LLC «Group of Companies nick-Premier», Moscow

Annotation. Methodology the design of individual heat points (ITP) is based on many years of practice and can be recommended for residential, administrative and industrial buildings. Reliance on known, proven formulas and patterns, adherence to regulatory and guidance documents. Complete set of ITP nodes are grounded, is used reliable products, there is no rigid adherence to certain technologies and manufacturers. There is the prospect of modeling processes in ITP and their further optimization.

Key letters: design methodology of an individual heating unit, a well-known formulas and patterns, used reliable products, testing practices, processes modeling, optimization.

УДК 621.1

ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ОБОРОТНОГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ТЕПЛООВОГО МЕТОДА СИСТЕМЫ ПОДДЕРЖАНИЯ ПЛАСТОВОГО ДАВЛЕНИЯ

Р.М. МУСТАФИНА*

*ФГБОУ ВПО «Казанский государственный энергетический университет»,
г. Казань

Аннотация. Основной целью системы поддержания пластового давления (ППД) при разработке нефтяных месторождений, содержащих высоковязкие нефти в большинстве случаев является тепловые методы добычи высоковязких нефтей. Для долговременной эксплуатации оборудования системы ППД в условиях высоких температур необходимо решение проблем путем охлаждения сбрасываемой воды до приемлемых температур и организации оборотного водоснабжения.

В данной работе представлены результаты анализа тепловой эффективности аппаратов, предназначенных для охлаждения высокотемпературных газовых потоков в системе оборотного водоснабжения.

Ключевые слова: технологический процесс, оборотное водоснабжение, энергоэффективность, конденсат.

Разработка нефтяных месторождений содержащих высоковязкие нефти путем теплового метода обеспечивает повышение нефтеотдачи. Однако при разработке залежей высоковязких нефтей возникают проблемы с большими затратами на аппаратурное оформление технологического процесса, работоспособности оборудования в условиях высоких температур закачиваемой жидкости и утилизации неиспользуемого конденсата в процессе выработки горячей воды. Сегодня актуальным остается изучение методов защиты атмосферного воздуха от оксидов азота дымовых выбросов аппаратов, выхлопных газов двигателей топливно-энергетического комплекса. Отходящие газы содержат, как правило, от 0,05 до 0,4 об. % оксидов азота, которые запрещается выбрасывать в атмосферу. Для обезвреживания дымовых газов от оксидов азота разработаны разнообразные методы.

Решение проблем, связанных с повышенной температурой возможно охлаждением сбрасываемой воды до приемлемых температур с утилизацией тепловой энергии.

Рассматриваемые методы подразумевают обратное использование сбрасываемых паров после технологического процесса. Метод включает проведение технологических процессов системы газ-жидкость с использованием дымовых газов для нужд производства. В процессе разделения газожидкостной эмульсии происходит разделение потоков с образованием очищенного газа и конденсата.

На рассматриваемом участке промышленного объекта ОАО «Татнефть» осуществляется закачка пара в паронагнетательные скважины и утилизация горячей воды в систему поддержания пластового давления (ППД).

Закачка пара в паронагнетательные скважины и утилизация через систему поддержания пластового давления осуществляется с максимальным объемом закачиваемой воды $5500 \text{ м}^3/\text{сут.м}$. Средний объем закачки в одну скважину $214,3 \text{ м}^3/\text{сут}$. Давление на устье нагнетательной скважины $3,5\text{--}6,5 \text{ Мпа}$. Существующий технологический процесс по закачке пара в паронагнетательные скважины осуществляется по схеме: пресная вода с водозабора ($t = 10\text{--}20^\circ\text{C}$) → два теплообменника (ТО-1 и ТО-2) ($t = 45\text{--}55 \text{ }^\circ\text{C}$) → ПГУ(пар) → паронагнетательные скважины.

Существующий процесс для системы ППД: горячая вода с УПСВН ($t=80^\circ\text{C}$) и пресная вода с водозабора ($t = 10\text{--}20^\circ\text{C}$) → два теплообменника (ТО-1 и ТО-2) ($t = 60\text{--}70 \text{ }^\circ\text{C}$) → буллит → шурф → нагнетательные скважины (рис. 1).

Охлаждённая вода (температура воды $60\text{--}70 \text{ }^\circ\text{C}$) после теплообменников направляется для дополнительной выработки пара и горячей воды в шесть котлоагрегатов. Производительность одного котла $12\ 000 \text{ т/час}$. Горячая вода поступает в систему ППД. Дымовые газы после процесса выбрасываются через дымовые трубы в атмосферу. Сточная вода, поступает после отделения от высоковязких нефтей с установки подготовки сверхвязких нефтей (УПСВН). Промывочная подогретая вода с выхода теплообменника направляется в парогенераторную установку (ПГУ) для дальнейшей закачки пара в паронагнетательные скважины.

При дальнейшей разработке и увеличения количества скважин нефтяного месторождения потребуется большее количества выработки пара и горячей воды для нагнетания в пласт. Парогенераторная установка, нагреваемая за счёт электрической энергии, использует поступающую

жидкость для производства пара в относительно небольших количествах. Отсюда следует, что нерациональное использование тепла при увеличении потребления и излишние затраты на электроэнергию являются недостатком существующего технологического процесса. Анализ рассматриваемого объекта предполагает добавление в существующую схему оборудования в качестве использования выработанного тепла для обогрева помещений и очистки дымовых газов, с целью уменьшения энергозатрат по предлагаемой схеме (рис. 2).

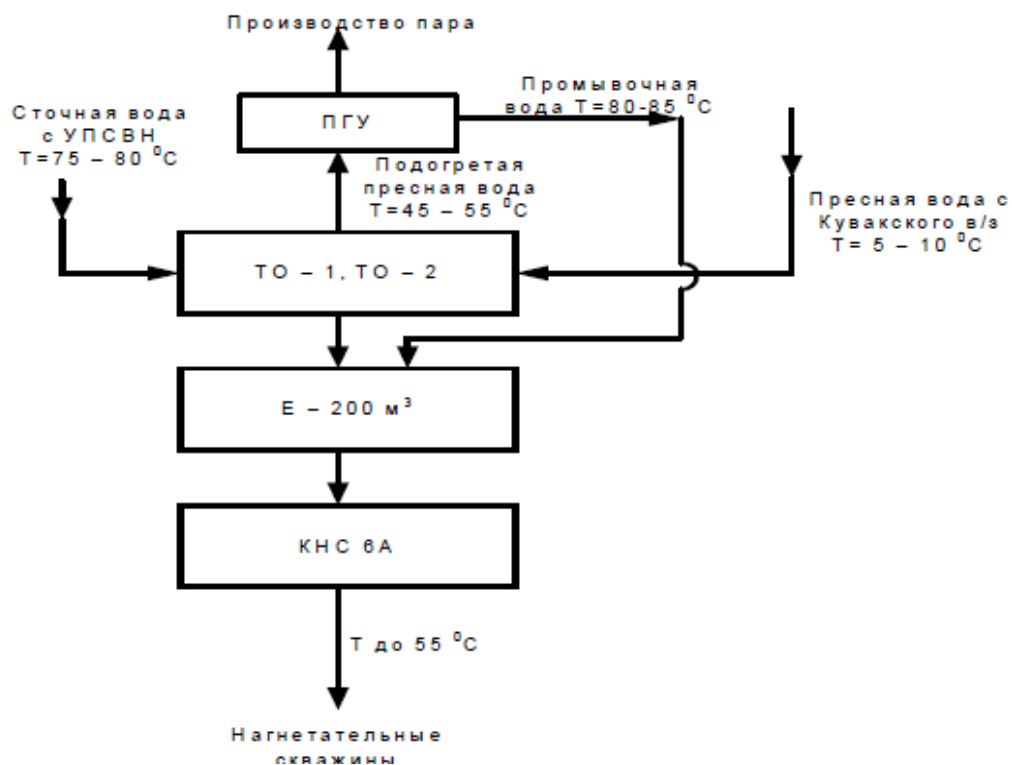


Рис. 1. Существующая технологическая схема

Отработанный пар через установку смешения подается в сепарационную установку для разделения газоконденсатной смеси и вторичного конденсата, где происходит разделение газожидкостных потоков, очистка от капельной влаги и осушка газа. В результате данного взаимодействия очищенный газ охлаждается и происходит выброс очищенного газа в атмосферу через дымовую трубу. Конденсируемый газожидкостный поток сепарируется и конденсат в очищенном виде направляется в систему обогрева. Далее охлаждаясь до температуры $t = 40\text{ }^{\circ}\text{C}$ жидкость путем нагнетания насосными установками вновь поступает в начало процесса. Смешиваясь с горячим воздухом охлажденная жидкость, образует непрерывный процесс теплоснабжения.

Постоянное поступление в начале существующего технологического процесса горячих паров и вторичного конденсата обеспечивает увеличение выработки газожидкостной смеси (конденсата). Увеличение количества пара путем взаимодействия ранее выделенного охлажденного конденсата способствует большей эффективности сепарации процесса и соответственно скорости процесса.

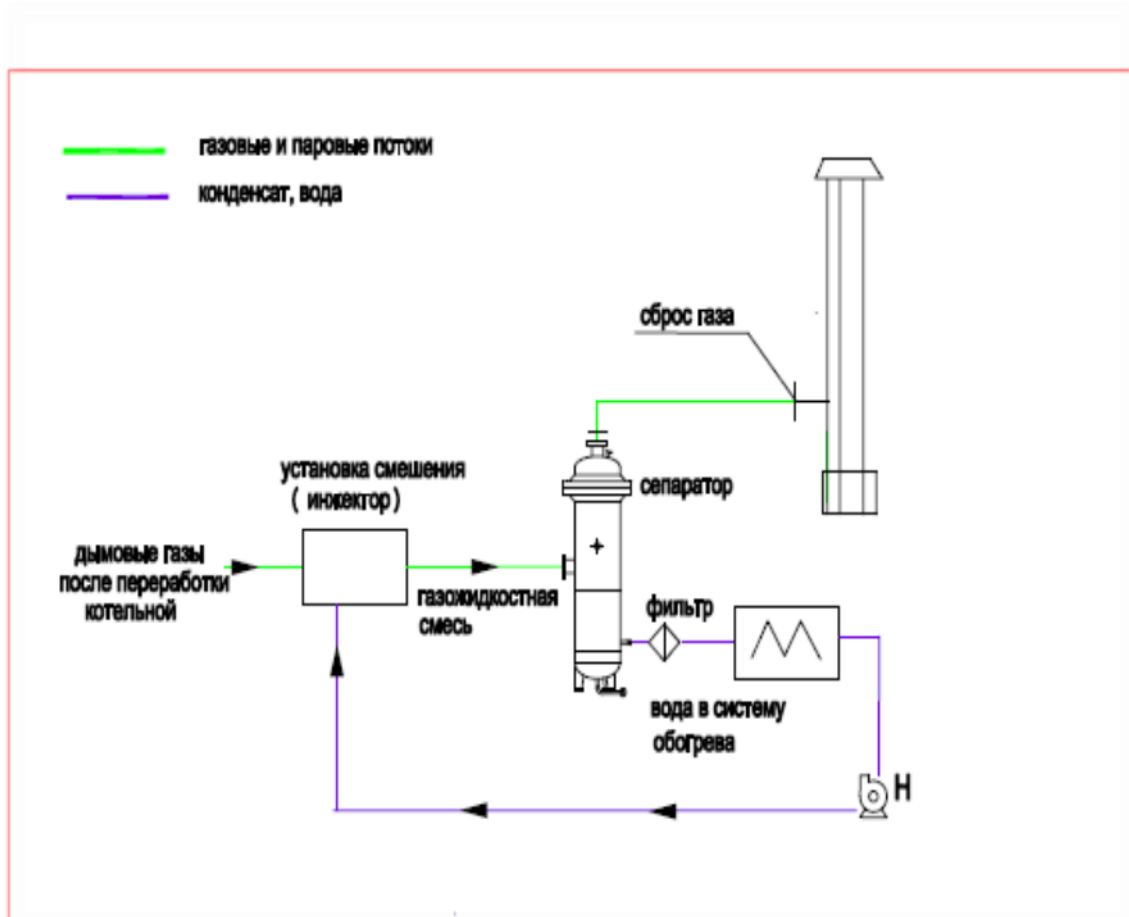


Рис. 2. Модель технологического процесса

Закручивающий узел вихревого прямоточного циклона газосепаратора создает центробежную силу, что позволяет эффективно (до 99,9 %) сепарировать капли диаметром свыше 10 мкм. Распределение газовой и жидкой фаз с предварительным их отделением друг от друга из-за равномерного распределения фаз по поперечному сечению аппарата, способствует повышению их производительности и разделяющей способности. Очистка и осушка газа от газового конденсата происходит с помощью абсорбции жидким абсорбентом в виде собственного газового конденсата.

Расчет системы рекуперации для получения характеристик определяющих энергоэффективность технологического процесс показывает:

Расход $G = 30000 \text{ м}^3/\text{ч}$;

Температура начальная для влажного воздуха $t_{\text{н}} = 120 \text{ }^\circ\text{C}$;

Средняя температура конденсации: $t_{\text{к}} = 45 \text{ }^\circ\text{C}$;

Точка росы $t_{\text{р}} = 55 \text{ }^\circ\text{C}$;

Расход теплоты: $Q = 1165,6 \text{ кВт}$;

Влажность 7,86 %;

Влагосодержание 112,0 г/кг;

Энтальпия составляет 425,2 кДж/кг, коэффициент теплоотдачи при конденсации водяного пара составляет $10350 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \times \text{К})$.

Энтальпия влажного воздуха складывается из энтальпии сухой его части и энтальпии водяных паров. В результате конвективного теплообмена воздуху передается тепло. При поступлении водяного пара в воздух передается теплота парообразования и энтальпия воздуха возрастает.

Таким образом, обеспечивается непрерывная подача теплоэнергии для собственных нужд промышленного объекта необходимого для обслуживания и эксплуатации.

Преимуществом данного процесса является снижение энергозатрат и минимальное количество устанавливаемого оборудования, увеличение выработки пара и уменьшение выбросов неотработанного газа в атмосферу.

Вывод

Устанавливаемое технологическое оборудование затрачивает минимальное количество электроэнергии, что экономически целесообразно ввиду минимизации финансовых затрат на закупку дополнительного энергооборудования и затрат на электроэнергию. Увеличение выработки пара способствует энергоэффективности путем коэффициента теплоотдачи. То есть можно сделать вывод, что применение метода повышает тепловую эффективность системы рекуперации. Вторичная переработка конденсата применима для теплоснабжения промышленного объекта, что соответственно существенно сокращает затраты электроэнергии используемой на электрообогрев.

Список литературы

1. РД 153-39.0-705-11. Регламент по совершенствованию технологий и технологических схем системы ППД. – Бугульма, 2010. – 100 с.
2. Утилизация тепла дымовых газов в экономайзерах вихревого типа / Н.М. Нуртдинов. – Казань, 2008. – 118 с.
3. Тепловые электрические станции, их энергетические системы и агрегаты / Д.Ю. Бухонов. – М., 2007. – 137 с.
4. Аронов И.З. Использование тепла уходящих газов газифицированных котельных. – М.: «Энергия», 1967. – 192 с.
5. Описание патента Бюл. № 3 «Способ очистки газов» / Р.Н. Хамидуллин. – Казань, 2014. – 9 с.

IMPROVING THE ENERGY EFFICIENCY OF WATER RECYCLING USING A THERMAL METHOD OF RESERVOIR PRESSURE MAINTENANCE SYSTEM

R.M. MUSTAFINA

FSBEI HPE «Kazan power-engineering university», Kazan

Annotation. The main purpose of the system of reservoir pressure maintenance in oil reservoirs containing high viscosity oil in most cases is thermal methods of extraction of high-viscosity oils. For long-term operation of the equipment of the system for maintaining reservoir pressure at the high temperatures necessary to solve the problems by cooling water discharged to a suitable temperature and circulating water supply.

This paper presents the results of the analysis of the thermal efficiency of the apparatus designed for cooling high-temperature gas flows in the water recycling system.

Key letters: technological process, water recycling, energy efficiency, condensate.

УДК 621.643.001:536.2

ТЕПЛОВЫЕ ПОТЕРИ В ТЕПЛОВЫХ СЕТЯХ В УСЛОВИЯХ ЗАТОПЛЕНИЯ

В.Ю. ПОЛОВНИКОВ

ФГАОУ ВПО «Национальный исследовательский Томский
политехнический университет», г. Томск

Аннотация. Приведены результаты анализа тепловых потерь в канальных тепловых сетях в условиях затопления с использованием конвективно-кондуктивной модели теплопереноса. Установлено, что для рассматриваемого случая увеличение тепловых потерь теплопровода в условиях затопления составляет от 1,5 до 64,3 % и обусловлено резким увеличением эффективных теплофизических характеристик изоляционных слоев при их увлажнении.

Ключевые слова: тепловые сети, тепловые потери, теплопровод, увлажнение изоляции, затопление.

Изменение температурно-влажностных условий эксплуатации тепловой изоляции различных объектов промышленной теплоэнергетики оказывает существенное влияние на их тепловые потери [1–3]. В основном это относится к ограждающим конструкциям зданий [1, 2] и тепловой защите трубопроводов систем теплоснабжения [3].

Высокий уровень тепловых потерь в тепловых сетях [4] и усиление роли децентрализованного теплоснабжения [5] создали предпосылки для разработки новых подходов [3, 6] к исследованию тепловых режимов и анализу фактических тепловых потерь в сетях теплоснабжения. При этом главным фактором, приводящим к повышению уровня тепловых потерь, является работа теплопроводов тепловых сетей в условиях затопления и увлажнения изоляции [3]. До настоящего времени при проведении анализа тепловых потерь в тепловых сетях, работающих в условиях затопления, область решения ограничивалась внешней поверхностью тепловой изоляции и использовались только кондуктивные модели теплопереноса [3], не учитывающие конвективное движение среды [6] в полости канала при канальной прокладке теплопроводов, являющейся наиболее типичной для России [7].

Целью данной работы является анализ тепловых потерь в канальных тепловых сетях в условиях затопления с использованием конвективно-кондуктивной модели теплопереноса.

В качестве примера рассматривается широко распространенная в РФ конфигурация теплопровода подземной прокладки [7] – непроходной железобетонный канал и трубопровод изолированный минеральной ватой и защитным покровным слоем (рис. 1). Предполагается, что полость канала (рис. 1) заполнена водой, а покровный слой и тепловая изоляция увлажнены.

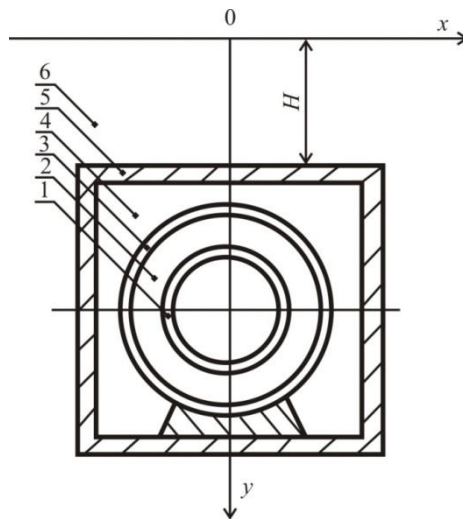


Рис. 1. Однотрубный подземный канальный теплопровод: 1 – металлическая стенка трубы; 2 – слой тепловой изоляции; 3 – покровный слой; 4 – полость канала; 5 – железобетонная стенка канала; 6 – грунт

Для рассматриваемой области (рис. 1) решалась двумерная сопряженная стационарная задача конвективно-кондуктивного теплопереноса в системе «слой тепловой изоляции – покровный слой – полость канала – стенка канала теплопровода – грунт – окружающая среда». Математическая модель для рассматриваемой задачи полностью аналогична модели, приведенной в [6]. Решение этой задачи получено методом конечных элементов [8] с использованием неравномерной конечно-элементной сетки. Количество элементов выбиралось из условий сходимости решения, так чтобы относительное изменение градиентов температур на границах области расчета не превышало 0.5 %.

Исследования проводились для теплопровода, конфигурация которого аналогична конфигурации описанной в [6]: диаметр условного прохода 600 мм, изоляция – минеральная ватой (толщина 70 мм) [7], покровный слой – песчанно-цементная штукатурка по каркасу из металлической сетки толщиной 20 мм [7]. Рассматривался типичный для тепловых сетей РФ сборный одноячейковый железобетонный канал марки КЛс210-120 [6] с толщиной стенок 135 мм. Расстояние

от поверхности грунта до верхней части канала составляло $H = 1$ метр (рис. 1). Температура внутренней поверхности слоя теплоизоляции принималась равной 373 К, а температура внешней среды составляла – 273 К. Коэффициент теплоотдачи от грунта к внешней среде принимался равным $15 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$.

Теплофизические свойства покровного слоя и тепловой изоляции (рисунок 1) в условиях их увлажнения определялись как эффективные с учетом объемной доли воды в пористой структуре материалов [9]. Например, эффективный коэффициент теплопроводности тепловой изоляции вычисляется из соотношения:

$$\lambda_n^{\text{эф}} = \lambda_n \varphi_n + \lambda_v \varphi_v,$$

где λ – теплопроводность, φ – объемная доля, и – изоляция, в – вода.

Здесь следует отметить, что максимально возможное объемное содержание воды в покровном слое и тепловой изоляции ограничено значениями открытой пористости материалов и не превышает 73 %. Значения теплофизических характеристик тепловой изоляции, покровного слоя, стенок канала и грунта, использовавшиеся при проведении численных исследований соответствовали величинам, приведенным в [6].

Обоснованность и достоверность результатов исследований следует из проведенных проверок используемых методов на сходимость и устойчивость решений на множестве сеток, выполнения условий баланса энергии на границах области расчёта. Относительная погрешность расчётов во всех вариантах численного анализа не превышала 0,5 %, что приемлемо при оценке тепловых потерь в тепловых сетях. Сопоставление результатов математического моделирования с известными данными по теоретическому исследованию теплопереноса в зонах размещения подземных теплотрасс [10] и экспериментальному определению тепловых потерь теплопроводов в условиях затопления [3] позволяет говорить о хорошем качественном и количественном согласовании результатов. Относительные отклонения между результатами экспериментальных [3] и теоретических исследований тепловых потерь теплопроводов в условиях затопления составляют не более 17 %. Необходимо отметить, что приведенное здесь значение относительного отклонения между результатами экспериментальных и теоретических исследований, является максимально возможным, так как эксперименты [3] проводились в условиях отсутствия покровного слоя на теплопроводе. Покровный слой (рисунок 1) является дополнительным

теплоизоляционным слоем, а, следовательно, в реальности относительное отклонение будет меньше чем приведенное выше.

Результаты численного моделирования позволяют сделать вывод о закономерном увеличении тепловых потерь рассматриваемого теплопровода с ростом объемной доли воды в пористой структуре изоляционных слоев. Для рассматриваемого случая увеличение тепловых потерь теплопровода в условиях затопления составляет от 1,5 до 64,3 %. Это обусловлено резким изменением эффективных теплофизических характеристик покровного слоя и тепловой изоляции при их увлажнении.

Отдельный интерес представляет анализ тепловых потерь рассматриваемой системы (рис. 1) без увлажнения теплозащитных слоев (при $\varphi_v = 0.0$). В этом случае рост теплотерь в условиях затопления по сравнению с потерями, когда полость канала занимает влажный воздух [6], составляет около 1,5 %. Это обстоятельство объясняется тем, что средние температуры среды в полости канала (влажный воздух или вода) отличаются друг от друга не значительно. Разница в значениях средних температур среды в полости канала в этих условиях составляет не более 0.1 К. Этот вывод позволяет говорить о том, что надежная гидроизоляция теплопроводов способна предотвратить значительный рост тепловых потерь в тепловых сетях в условиях затопления.

На рис. 2 приведены типичные температурные поля в зоне прокладки теплопровода: в условиях затопления канала тепловой сети при $\varphi_v = 0,73$ и в случае, когда полость канала занимает воздух с относительной влажностью 100 % (отмеченные верхним индексом «*»).

Распределения температур в рассматриваемой области решения свидетельствует о том, что изотермические линии (рис. 2) сгущаются непосредственно над теплопроводом и более разрежены при удалении от него, что соответствует представлениям о процессах теплопроводности и хорошо согласуется с результатами предыдущих исследований [6] и теоретическими работами других авторов [10]. Рис. 2 наглядно демонстрирует существенное изменение температурного поля в зоне прокладки теплопровода в условиях затопления канала тепловой сети. Одноименные изотермы для случаев, когда полость канала занимает влажный воздух и когда теплопровод работает в условиях затопления при $\varphi_v = 0,73$, находятся друг от друга на расстоянии от 1 метра и более.

В заключении необходимо еще раз сказать о том, что наличие в конструкциях теплопроводов тепловых сетей надежной гидроизоляции позволит минимизировать тепловые потери при их эксплуатации

в условиях затопления. Подобными конструкциями могут стать теплопроводы с индустриальной тепло- и гидроизоляцией [7].

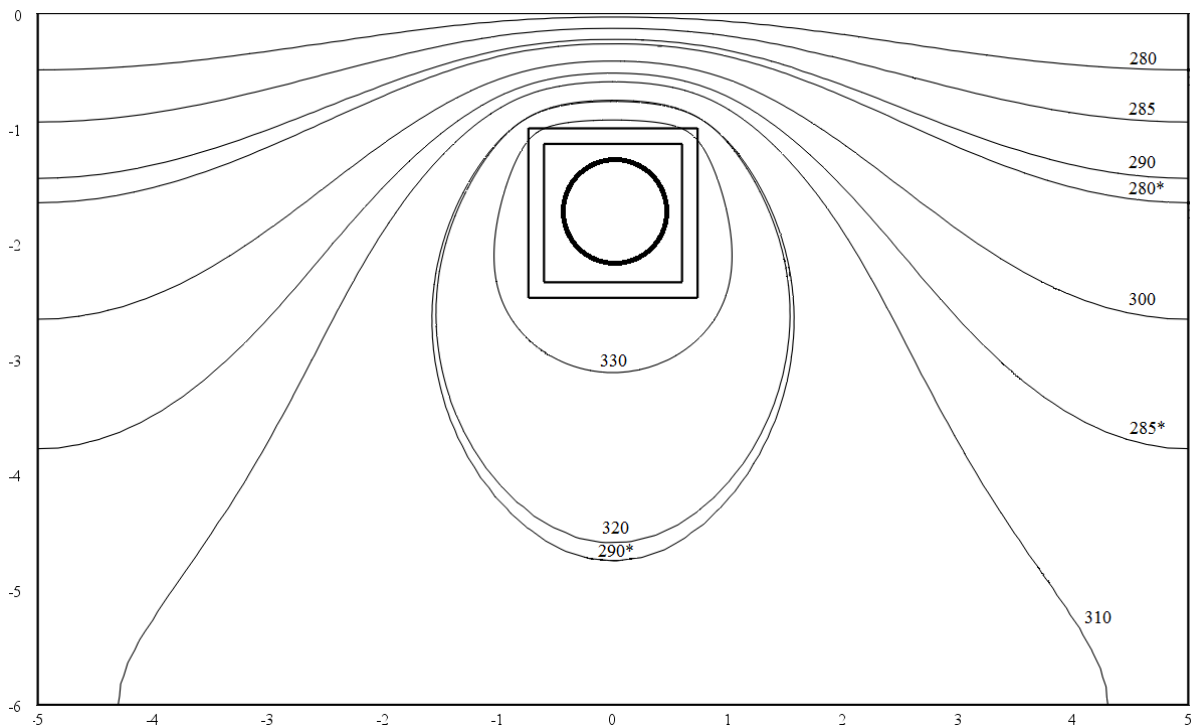


Рис. 2. Типичное температурное поле в зоне прокладки теплопровода в условиях затопления канала тепловой сети

Список литературы

1. Корниенко С.В. О нормировании тепловой защиты зданий с влажным и мокрым режимами // Энергобезопасность и энергосбережение. – 2014. – № 5. – С. 19–24.
2. Корниенко С.В. О применимости методики СП 50.13330.2012 к расчету влажностного режима ограждающих конструкций с мультizonальной конденсацией влаги // Строительство и реконструкция. – 2014. – № 5 (55). – С. 29–37.
3. Кузнецов Г.В., Половников В.Ю. Экспериментальное определение тепловых потерь теплопроводов в условиях затопления // Промышленная энергетика. – 2010. – № 7. – С. 43–45.
4. Фахразиев И.З., Зацаринная Ю.Н. Малая энергетика России. Анализ текущего состояния и перспективы развития // Вестник Казанского технологического университета. – 2013. – Т. 16. – № 20. – С. 350–352.

5. Стенников В.А., Якимец Е.Е., Жарков С.В. Оптимальное планирование теплоснабжения городов // Промышленная энергетика. – 2013. – № 4. – С. 9–15.
6. Кузнецов Г.В., Половников В.Ю. Новый подход к анализу тепловых режимов систем транспортировки тепла // Энергосбережение и водоподготовка. – 2011. – № 2. – С. 64–67.
7. Справочник проектировщика. Проектирование тепловых сетей / Под ред. А.А. Николаева. – Курган: Интеграл, 2010. – 357 с.
8. Самарский А.А., Гулин А.Н. Численные методы математической физики. – М.: Научный мир, 2000. – 316 с.
9. Чудновский А.Ф. Теплофизические характеристики дисперсных материалов. – М.-Л.: Физматгиз, 1962. – 456 с.
10. Иванов В.В., Вершинин Л.Б. Распределение температур и тепловых потоков в зоне подземных теплотрасс // Вторая Российская национальная конференция по теплообмену: Теплопроводность, теплоизоляция. – М.: Изд-во МЭИ, 1998. – Т. 7. – С. 103–105.

HEAT LOSS IN HEATING NETWORKS IN FLOODING CONDITIONS

V.YU. POLOVNIKOV

National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk

Annotation. Results of analysis of heat loss in a channel heat networks in terms of flooding with using convective-conductive heat transfer model for example of the widespread in Russia configuration of hot water system underground installation (impassable concrete channel and pipe insulated with mineral wool and a protective coating layer) were obtained. In this case the increase of heat loss in a hot water system in terms of flooding is from 1,5 to 64,3 %. It is due to a sharp increase in the effective thermal characteristics of the coating layer and thermal insulation in their moisture. Use of a reliable waterproofing of heat prevents a significant increase in thermal heat loss in terms of flooding was shown.

Key letters: heat network, heat loss, hot water system, humidification insulation, flooding.

УДК 062.006.063

ПРОБЛЕМЫ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ

А.С. ВИНОГРАДОВ, А.А ЧИЧИРОВ, Н.Д. ЧИЧИРОВА
ФГБОУ ВПО «Казанский государственный энергетический университет»,
г. Казань

Член общественной палаты Одинцовского муниципального района
Московской области

ООО «Аргент Альянс», Московская область, г. Одинцово

*Актуальные проблемы теплоснабжения.
Причины появления. Пути решения*

Предприятия теплоснабжения являются одной из наиболее важных подотраслей системы жилищно-коммунального хозяйства, их деятельность направлена на обеспечение комфортных условий проживания. От качества услуг по теплоснабжению зависит социальный климат, однако в работе по обеспечению именно качества теплоснабжения жилищного фонда и объектов соцкультбыта достаточно много проблем. Качество услуг, как правило, остается на низком уровне, однако тарифы по оплате из года в год возрастают, причем не всегда обоснованно. Выявление актуальных проблем системы теплоснабжения, совершенствование деятельности местных органов самоуправления в этом направлении должны способствовать изменению состояния дел в жилищно-коммунальном хозяйстве в целом и в теплоэнергетике, как подотрасли ЖКХ, в частности.

На сегодняшний день в теплоэнергетике существует масса серьезных проблем, среди которых такие, как износ фондов, кадровый вопрос, отсутствие стратегии развития отрасли.

Решение перечисленных проблем входит в круг задач органов местного самоуправления, которые обозначены действующим законодательством, определяющим полномочия органов местного самоуправления.

От того насколько эффективно реализуется эти полномочия зависит состояние теплоэнергетики. Важно определить пути совершенствования деятельности местных органов управления в направлении повышения уровня развития теплоэнергетики, ее эффективности.

Экспертными исследователями состояния теплоэнергетики России выявлены следующие наиболее остро обозначавшиеся проблемы:

- износ фондов;
- кадровый вопрос;
- отсутствие стратегии развития отрасли;

Износ фондов характеризуется:

– устаревшим оборудованием для выработки и транспортировки тепловой энергии, что вызывает низкий коэффициент полезного действия при их работе и нарастающее число отказов с соответствующими отрицательными последствиями;

– велико количество аварий и утечек, конструкция теплопроводов устарела, вследствие чего возникают высокие тепловые потери;

Что касается последнего, то это особо острый фактор. Так, по данным экспертных исследований, опубликованных в электронном журнале «Экономические системы» (№ 8, август 2007 года) в России примерно до 200 000 километров коммунальных сетей. Из них более половины уже исчерпало свой амортизационный срок. Изношенность этих сетей достигла 60–70 %, около 25–30 % в аварийном состоянии. Данная проблема остается наиболее острой в теплоэнергетике до настоящего времени, поскольку замена труб почти не ведется.

Не менее острой проблемой в теплоэнергетике, является проблема кадров. С одной стороны это дефицит кадров и новых специалистов, с другой стороны - перекос в сторону от «профессионалов» к «менеджерам», от профессиональных энергетиков к «управленцам». Нередки случаи, когда теплоэнергетикой занимаются люди, не знающие технологию, экономику теплоэнергетики.

Тепловая энергетика длительное время функционирует фактически без какой-либо системы долгосрочного планирования развития. Если раньше, в советское время, в рамках системы Госплана на годы вперед планировалось развитие мощностей, сетей и т.д., то с распадом прежней политической системы тепловая энергетика вынуждена практически долгое время работать без какой-либо серьезной системы планирования развития. Раньше в городах разрабатывали программы развития города, на этой основе разрабатывались генеральные планы развития инженерных систем, в том числе и теплоснабжения. Госплан выделял средства на строительство, на реконструкцию. Затем, после перестройки, вся тепловая энергетика оказалась в руках муниципальной власти, которая, как правило, и без проблем теплоэнергетики, постоянно испытывает дефицит бюджетных средств для текущей деятельности, не говоря уже о перспективных планах развития. В принципе планы перспективного развития имеются повсеместно, но они не подкреплены финансовыми средствами.

Сегодня назрела жизненная необходимость решения проблемы стратегического планирования. В этой ситуации, актуально говорить о необходимости создания структуры, курирующей вопросы стратегического развития и планирования тепловой энергетики.

Нерешенность проблемы сбережения тепла и энергоресурсов, требующихся для его производства, влечет за собой, как уже отмечено выше, другие негативные явления, неблагоприятно сказывающиеся как на отрасли, так и на потребителе. Одно из них – рост тарифов. Одной из существенных причин роста тарифов на тепло являются тепловые потери, возникающие главным образом, вследствие устаревшего и изношенного оборудования. Схематично цепочка выглядит следующим образом: «Дешевое/устаревшее оборудование – высокие потери – возмещение потерь тепловыми предприятиями – рост тарифов». Во многих зарубежных странах тарифы на тепло практически не растут (или же растут довольно медленно и незначительно), в том числе и потому, что минимизированы потери. В России же потери при транспортировке компенсируются за счет роста тарифов. Сегодня российской теплоэнергетике свойственно отсутствие стимула беречь ресурсы, внедрять энергосберегающие технологии и оборудование. Энергосбережение продекларировано в «Энергетической стратегии России до 2020 года», но не обеспечено потенциалом современных теплоэнергетических технологий промышленности.

Теплоэнергетические предприятия платят за топливо по факту получения, в соответствии с Гражданским Кодексом РФ. А компенсацию своих затрат, когда они отпускают товар потребителям, по факту поставки они не получают, потому что все жилищные организации, управляющие компании стремятся расплачиваться с теплоснабженцами, как с ними расплачивается население, а именно 1/12-я часть каждый месяц в течение года. Чтобы своевременно расплачиваться с поставщиками энергоресурсов, предприятия теплоэнергетики вынуждены прибегать к заемным средствам, а это приводит к дополнительным затратам.

Пока не было Жилищного Кодекса РФ и «Правил предоставления коммунальных услуг», взаимоотношение теплоэнергетических предприятий с управляющими компаниями, прочими жилищными организациями не имели четких границ.

В теплоэнергетике остается низким уровень безопасности: оборудование имеет большой износ, недостаточно степеней защиты и автоматизации, часто в системе отсутствует резервирование. Причинами

низкого уровня безопасности в теплоэнергетике являются дефицит финансовых средств и несовершенство законодательства.

Следующая проблема теплоэнергетики - отсутствие благоприятных условий для привлечения частных инвестиций, дефицит инвестиционных проектов. Чтобы подготовить грамотный, отвечающий всем необходимым требованиям и стандартам инвестиционный проект, под который заинтересованный инвестор будет готов выделить деньги, соискателю инвестиций нужно провести серьезный аудит, требующий больших средств, которых, как правило, нет.

Важным показателем формирования рыночной модели в теплоэнергетике является система и качество отношений «потребитель-поставщик». Этот показатель пока что находится в неудовлетворительном состоянии, а именно: в отрасли не сформирована современная модель взаимодействия поставщика и потребителя, соответствующая требованиям конкурентного рынка. Наблюдается монополизм и диктат производителей тепла, потребитель практически вынужден оплачивать все обоснованные и необоснованные издержки производителя тепла в виде утвержденных тарифов на оплату услуг по теплоснабжению.

Таким образом, проблемных вопросов в отрасли теплоэнергетики предостаточно, и задача органов управления на всех уровнях проводить системную, целенаправленную работу на местах по выявлению недостатков и принятию мер по их устранению.

В период с 2000 по 2010 гг. происходят процессы децентрализации теплоснабжения, доля тепловой энергии, производимой на индивидуальных установках, увеличилась на 20 %.

Что касается эффективности производства и распределения тепловой энергии в целом по стране за эти годы, то она практически не изменилась.

Большие проблемы в долговечности тепловых сетей. В условиях, когда нет химводоподготовки, срок службы сетей не превышает 6–8 лет.

Техническое состояние тепловых сетей многих населенных пунктов неудовлетворительное: отсутствует гидроизоляция, что приводит к увеличению потерь и повышению расхода топлива; отсутствие химводоподготовки на котельных приводит к значительной коррозии и снижению долговечности тепловых сетей. Отложение соединений железа на стенках труб приводит к уменьшению пропускной способности трубопроводов, перерасходу топлива. Многие сети гидравлически разрегулированы, что приводит к снижению качества теплоснабжения, к перерасходу топлива и электроэнергии.

Одной из проблем является отсутствие автоматизация тепловых сетей, в том числе: регуляторов температуры, как на отопительные системы, так и на системы горячего водоснабжения. Практически отсутствуют узлы учета. Только летом 2015 года активно начали размещать заказы на проектирование, монтаж и пуско-наладку узлов учета тепловой энергии.

Ориентация российской энергетики на теплофикацию и централизованное теплоснабжение как основной способ удовлетворения тепловых потребностей городов и промышленных центров технически и экономически себя оправдали. Однако в работе систем централизованного теплоснабжения и теплофикации имеется много недостатков, неудачных технических решений, неиспользованных резервов, которые снижают экономичность и надежность функционирования таких систем:

- техническая оснащенность и уровень технологических решений при строительстве тепловых сетей соответствуют состоянию 1960-х годов, в то время как резко увеличились радиусы теплоснабжения, и произошел переход на новые типоразмеры диаметров труб;

- качество металла теплопроводов, теплоизоляция, запорная и регулировочная арматура, конструкции и прокладка теплопроводов значительно уступает зарубежным аналогам, что приводит к большим потерям тепловой энергии в сетях;

- практическое отсутствие регулирование отпуска теплоты на отопление зданий в переходные периоды, когда особенно большое влияние на тепловой режим отапливаемых помещений оказывают ветер, солнечная радиация, бытовые тепловыделения;

- перерасход топлива и перетоп зданий в теплые периоды отопительного сезона;

Руководитель муниципального предприятия, работая по контракту с администрацией, обязан при любых обстоятельствах обеспечить качественное теплоснабжение, хотя одновременно обязан обеспечить только поставку оплаченного количества тепла. Имея контракт с администрацией, руководитель муниципального предприятия вынужден выполнять любые самые неквалифицированные распоряжения администрации. В том тоже проблема муниципального предприятия теплоэнергетики.

Несовершенство системы управления, некомпетентность руководства администрации, фактическое банкротство большинства теплоснабжающих предприятий привели к тому, что за этими

предприятиями в основном осуществляется финансовый контроль. Но контроль средней заработной платы привел к росту численности и снижению квалификации; экономия на эксплуатационных расходах – к ликвидации важных технических подразделений, снижению уровня эксплуатации и ремонта; удешевление замены трубопроводов тепловых сетей предопределило необходимость их частой замены и огромные теплопотери.

В своей статье «Проблема теплоснабжения является одной из наиболее острых в энергетике» доктор технических наук И.М. Калнинь, кандидаты технических наук Л.Я. Лазарев, А.И. Савицкий отмечают, что современный анализ энергопроизводства и энергопотребления в мире показывают, что несмотря на наметившееся уменьшение доли потребляемого органического топлива в общем балансе за счет использования возобновляемых источников энергии (ветровой, солнечной, биоэнергии и др.), основным источником энергии по-прежнему останется органическое топливо - газ, нефть и уголь.

Здесь же отмечается, что последние два десятилетия в технической и научной периодике продолжается дискуссия об эффективности принятого в России для крупных и средних городов централизованного теплоснабжения, основанного на комбинированном способе производства тепла и электроэнергии на ТЭЦ. Однако, становится все очевиднее, что преимущества комбинированного способа производства тепла и электричества обесцениваются значительными потерями тепла в протяженных тепловых сетях, огромными затратами на их сооружение, эксплуатацию и ремонт.

Участники международной научно-производственной конференции «Энергообеспечение и энергосбережение», состоявшейся в г. Ярославле в 2009 году, отмечали, что в России энергосбережение развито весьма слабо и часто энергосберегающие технологии используются не эффективно.

Подавляющее большинство систем теплоснабжения работает с большим перерасходом топлива и электроэнергии. В целом удельное потребление энергоресурсов на одного человека в России превышает среднеевропейские показатели (по теплу в 2–3 раза, по воде в 1,5–2 раза).

Подавляющее большинство теплоснабжающих организаций не может предоставить качественные услуги в соответствии с действующими нормативами (температура воздуха внутри отапливаемых помещений должна быть 18–20 °С, температура воды на нужды горячего водоснабжения – 60 °С).

Участниками конференции в г. Ярославле выделены основные проблемы теплоснабжения:

- возраст большинства источников тепла больше 30 лет;
- тепловые сети ветхие, более 70 % подлежат замене;
- потери тепла в тепловых сетях достигают 30 %, так как из-за периодического или постоянного затопления сетей тепловая изоляция нарушена и пришла в негодность;
- потери тепла через «дырявые» окна составляют до 70 % от общих тепловых потерь зданий;
- в подавляющем большинстве индивидуальных и центральных тепловых пунктов отсутствует автоматика на отопление и ГВС;
- централизация теплоснабжения, особенно в крупных городах, достигла такого уровня, что режимами трудно или практически невозможно управлять;
- сокращение персонала на предприятиях (как инженерного, так и рабочего) привело к тому, что системы теплоснабжения не эксплуатируются, а только поддерживаются их жизнедеятельность, другими словами «латаются дыры»;
- источники тепла загружены нерационально: одни перегружены и работают с большим дефицитом тепла, другие недогружены и имеют значительный резерв тепловой мощности.

Перечисленные выше проблемы теплоэнергетики характерны для всей отрасли, как в крупных городах, так и в средних поселениях, в том числе и в городе Одинцово, Московской области. В принципе в каждом городе, при казалось бы общих проблемах, подходы могут совершенно разные, с учетом местных условий, но задача оптимизации теплоснабжения является приоритетной для всех органов местного самоуправления, поскольку теплоэнергетика является ключевым звеном реформирования жилищно-коммунального хозяйства.

Анализируя состояние теплоэнергетики в городе Одинцово, следует отметить, что, несмотря на большую работу по реализации полномочий органов местного самоуправления в области теплоэнергетики (организация бесперебойного теплоснабжения, обеспечение энергосбережения и энергоэффективности и т.д.), проблем в этих вопросах на уровне органов местного самоуправления (как и причин) достаточно много. К основным проблемам теплоэнергетики муниципального образования (Одинцовский муниципальный район) относятся:

- износ оборудования и инженерных сетей системы теплоснабжения;
- отсутствие надлежащей теплоизоляции сетей теплоснабжения, нарушение теплоизоляции контура зданий, потребляющих теплоэнергию;
- недостаток квалифицированных кадров вследствие низкого уровня оплаты труда;

- отсутствие материальной заинтересованности обслуживающего персонала в экономном расходовании энергоресурсов;
- недостаточное внимание внедрения передовых технологий в области теплоэнергетики;
- отсутствие реальной долгосрочной программы развития теплоэнергетики на местном уровне, в том числе и программа внедрения других источников теплоснабжения;
- слабая работа по реализации положений Федерального Закона № 261-ФЗ «Об энергосбережении и повышении энергетической эффективности»;
- ведомственная разобщенность системы теплоснабжения (муниципальные котельные, ведомственные котельные, принадлежащие акционерным обществам);
- разрегулированность систем теплоснабжения;
- высокая степень изношенности внутридомовых тепловых сетей;
- отсутствие на большинстве многоквартирных домов и объектов соцкультбыта приборов учета потребляемой тепловой энергии;
- отсутствие надлежащего контроля органов местного самоуправления за подготовкой объектов теплопотребления к отопительному периоду;
- наличие множества мелких, в том числе нерациональных котельных;
- нарушение тепловых режимов;
- нерациональная загрузка источников тепла;
- дефицит бюджетных средств, слабая инвестиционная политика на уровне органов местного самоуправления.

Вывод

Исходя из существующих проблем теплоэнергетики, на местном уровне предлагаются следующие пути их решения с непосредственным участием местных органов управления в пределах полномочий, обозначенных действующим законодательством:

При строительстве новых объектов жилья соцкультбыта внедрять индивидуальные источники тепла, так называемые поквартирные системы теплоснабжения, в том числе и многоэтажных домов.

Применение такой системы теплоснабжения позволит полностью исключить потери в тепловых сетях, позволит организовать индивидуальный учет и регулирование потребления теплоты в зависимости от экологических возможностей и физиологических потребностей.

Кроме того, применение поквартирного теплоснабжения приведет к снижению единовременных капитальных вложений и эксплуатационных затрат, а также позволит экономить энергетические и сырьевые ресурсы на выработку тепловой энергии и, как следствие этого, приведет к уменьшению нагрузки на экологическую обстановку.

Поквартирное теплоснабжение представляет собой вид децентрализованного теплоснабжения, при котором каждая квартира в многоквартирном доме оборудуется автономной системой обеспечения теплотой и горячей водой. Основными элементами системы поквартирного отопления являются отопительный котел, отопительные приборы, системы подачи воздуха и отвода продуктов сгорания.

Объективными предпосылками внедрения автономных систем теплоснабжения является:

- отсутствие свободных мощностей на централизованных источниках;
- уплотнение застройки объектами жилья;
- более низкие капиталовложения;
- возможность поддержания комфортных условий в квартире по своему собственному желанию, независимо от директивного решения о начале и окончании отопительного периода;
- появление на рынке большого количества различных модификаций отечественных и зарубежных теплогенераторов малой мощности.

Достоинствами децентрализованного (поквартирного) теплоснабжения являются:

- отсутствие необходимости отводов земли под тепловые сети и котельные;
- снижение потерь теплоты из-за отсутствия внешних тепловых сетей, снижение потерь сетевой воды, уменьшение затрат на водоподготовку;
- значительное снижение затрат на ремонт и обслуживание оборудования;
- полная автоматизация режимов потребления.

Внедрение поквартирной системы теплоснабжения позволит повысить ответственность собственников жилья за своевременную оплату коммунальных услуг (в данном случае за потребление ресурса).

Для решения проблем управленческого и экономического характера на уровне местных органов управления предлагается:

- провести мониторинг фактического технического состояния котельного оборудования и тепловых сетей, составить прогноз выбытия мощностей, определить объемы инвестирования;

– разработать долгосрочную программу развития системы теплоснабжения, обеспечивающую привлекательность для инвесторов.

Работа выполнена в рамках реализации базовой части государственного задания Минобрнауки РФ Высшим учебным заведениям (соглашение 2014/448 от 13.03.2014, код проекта № 3029).

Список литературы

1. Гражданский кодекс РФ.
2. Об общих принципах организации местного самоуправления в Российской Федерации: Федеральный Закон № 131-ФЗ от 06.10.2003 г.
3. Федеральный закон о теплоснабжении № 190-ФЗ от 27.07.2010 г.
4. Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации: Федеральный закон № 261-ФЗ от 23.11.2009 г.
5. Правила установления и изменения тепловых нагрузок // Приказ Министерства регионального развития РФ от 28.12.2009 г.
6. О порядке предоставления коммунальных услуг гражданам // Постановление правительства РФ № 307 от 23.06.2006 г.
7. Основные проблемы современного этапа развития теплоэнергетики России. – М.: Московская объединенная энергетическая компания, 2008.

PROBLEMS OF HEAT

A.S. VINOGRADOV, A.A. CHICHIROV, N.D. CHICHIROVA
FSBEI NPE «Kazan power-engineering university», Kazan
Member of the Public Chamber
of Odintsovo municipal district of Moscow region
LLC. «Argent Alliance», Moscow region, Odintsovo

Actual problems of heat supply. Causes. Solutions.

УДК 620.92

ЭКОНОМИЯ ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ В СИСТЕМАХ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ ЗА СЧЕТ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ТЕПЛОПОТРЕБЛЕНИЯ

Ю.Н. ЗВОНАРЕВА*, Ю.В. ВАНЬКОВ**

*Филиал ООО «КЭР-Инжиниринг» «ТатНИПИэнергопром», г. Казань

**ФГБОУ ВПО «Казанский государственный энергетический университет», г. Казань

Аннотация. Согласно 261-ФЗ «Об энергосбережении и повышении энергоэффективности», принятым в ноябре 2009 года, Жилищным Кодексом РФ, Постановлением правительства РФ № 307 «О порядке предоставления коммунальных услуг гражданам» собственники жилья имеют право регулировать потребление энергоресурсов в доме и оплачивать фактически потребленное количество ресурсов по показаниям приборов учета.

Опыт компаний, занимающихся вопросами энергосбережения, показывает, что высокая изношенность оборудования и невозможность погодозависимого регулирования подачи теплоносителя в систему отопления здания являются основными причинами неэффективного использования энергоресурсов со стороны системы отопления здания.

Внедрение автоматизированных узлов учета и регулирования (АУУ), расположенных непосредственно в отапливаемом здании, помимо создания комфортных условий внутри помещения приводит к снижению потребления тепловой энергии.

В работе рассмотрены экономические вопросы оптимизации узлов системы теплоснабжения на вводе в здания посредством установки автоматизированных узлов учета и регулирования на вводе в систему отопления.

Ключевые слова: индивидуальные тепловые пункты погодозависимое регулирование, снижение теплопотребления, экономическая эффективность.

На сегодняшний день, множество многоквартирных домов имеют традиционно нерегулируемые системы отопления.

Избыточное потребление тепла жилым фондом на сегодняшний день, по оценкам специалистов, составляет около 30–40 %. Одновременно

с энергонезэффективным использованием тепловой энергии, ежегодно происходит рост тарифов. Так, например, за период 2010–2015 гг. по городу Казани рост тарифа на тепловую энергию составил 36,1 %.

Экономии тепловой энергии в системах теплоснабжения до 20–30 % можно достичь за счет автоматического регулирования теплопотребления. Наиболее полно и эффективно задачи автоматизации могут быть реализованы с помощью индивидуальных тепловых пунктов зданий (ИТП) с возможностью регулирования теплопотребления по желанию потребителя в зависимости от температуры наружного воздуха, назначения объекта и пр.

Ранее нами были опубликованы результаты исследований, которые показали, что при переходе с ЦТП на ИТП фактическое снижение тепловой нагрузки на отопление жилых многоквартирных домов, в среднем составляет 33,5 % [1]

Для проведения оценки экономии тепловой энергии в результате проведения энергосберегающих мероприятий непосредственно на вводе в потребитель выбран жилой многоквартирный дом, расположенный по адресу: г. Казань ул. Амирхана, д. 2а.

Тариф на тепловую энергию на 2015 г. для населения г. Казани составляет: 1380,43 руб./Гкал с НДС.

Фактическое потребление тепловой энергии на нужды отопления за отопительный период 2014 г. составило 1144,3 Гкал или в стоимостном выражении в ценах 2014 г. 1579,6 тыс. руб. с НДС.

Оценка экономии тепловой энергии производилась на основании 2-х подходов:

1. Экспертном, по сложившемуся опыту использования энергосберегающих технологий;
2. Расчетном, по предоставленным данным с учетом методик определения потребности в тепловой энергии.

Согласно экспертной оценки экономия тепловой энергии в результате проведения энергосберегающих мероприятий, а именно: регулирование потребления тепловой энергии на отопление с помощью АУУ исходя из потребности и в зависимости от температуры наружного воздуха составляет до 20 % от общего потребления (рис. 1) [2].

Расчетный подход основан на сопоставлении фактического и проектного (нормативного) теплопотребления.

Нормативное потребление тепловой энергии здания определяется согласно методикам определения потребности в тепловой энергии [3] и [4]:

1. Нормативное количество тепловой энергии, необходимой для отопления здания в отопительный период:

$$Q_{\text{о проект}}^{\text{год}} = Q_{\text{о max пр}} \times T_{\text{отоп}} \cdot \frac{(t_{\text{вн}} - t_{\text{нар}}^{\text{ср}})}{(t_{\text{вн}} - t_{\text{нар}}^{\text{р}})} = 869,7 \text{ Гкал},$$

где $Q_{\text{о max пр}} = 0,3478 \text{ Гкал/ч}$ – проектная нагрузка системы отопления; $t_{\text{вн}} = 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$ – расчетная температура воздуха в отапливаемом здании; $T_{\text{отоп}}$ – продолжительность отопительного периода; $t_{\text{нар}}^{\text{ср}}$ – средняя температура наружного воздуха за отопительный период; $t_{\text{нар}}^{\text{р}}$ – расчетная температура наружного воздуха для проектирования отопления в местности, где расположено здание [5].



Рис. 1. Экономия тепловой энергии в результате проведения энергосберегающих мероприятий (экспертная оценка)

2. Расчетная оценка потенциала экономии тепловой энергии на нужды отопления в результате проведения энергосберегающих мероприятий:

$$\mathcal{E} = Q_{\text{о факт}} - Q_{\text{о норм}} = 1144,3 - 869,7 = 274,6 \text{ Гкал},$$

где $Q_{\text{о факт}}$ – фактическое теплотребление на нужды отопления за отопительный период; $Q_{\text{о норм}}$ – расчетное (нормативное) теплотребление на нужды отопления за отопительный период.

Определение вероятного потенциала энергосбережения тепловой энергии на нужды отопления основано на расчете средневзвешенной величины полученных значений экономии тепловой энергии [3] в двух вышеописанных подходах.

Результаты расчета представлены на рис. 2.

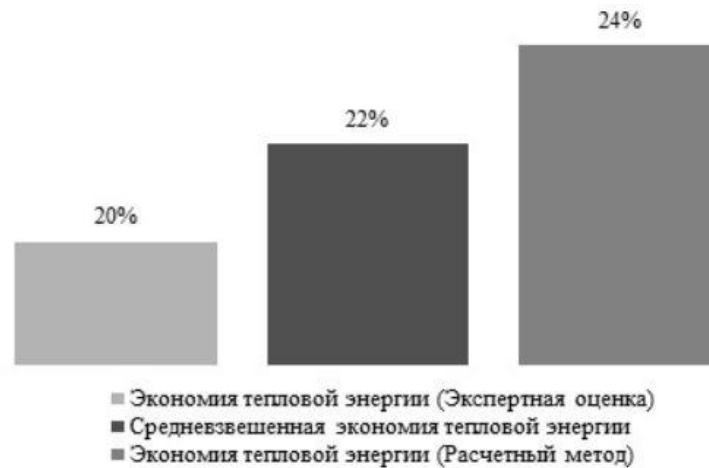


Рис. 2. Оценка совокупной экономии тепловой энергии в системе отопления

Вывод

Ежегодный ожидаемый эффект от реализации предлагаемых мероприятий может сэкономить до **22%** потребляемой и что не менее важно, оплачиваемой тепловой энергии.

В денежном выражении, согласно тарифа на тепловую энергию на 2015 год, снижение теплопотребления позволит собственникам жилья снизить стоимость предоставляемых услуг на сумму порядка **347,52 тыс. руб. с НДС в год**. При этом следует отметить, что за счет ежегодного роста тарифов на тепловую энергию, экономия будет увеличиваться.

В целом, эффективность реализации Проекта можно характеризовать значительным снижением теплопотребления здания и, соответственно, уменьшением платы за потребленные энергоресурсы.

Расчет экономии опирался на экспертную оценку. Достижение экономии тепловой энергии возможно только при правильной эксплуатации оборудования, периодическом контроле за его работой и при условии, что модернизируемые здания имеют достаточный уровень теплозащиты.

Список литературы

1. Звонарева Ю.Н., Ваньков Ю.В. Оценка энергетической эффективности и изменения показателей работы системы теплоснабжения с учетом поэтапного внедрения автоматических узлов учета и регулирования тепловой энергии на потребителях // 21 century: fundamental science and technology VII: Proceedings of the Conference. North Charleston, 7-8.09.2015, Vol. 2 – North Charleston, SC, USA: CreateSpace, 2015. – P. 131–133.

2. Сиваев С.Б., Гордеев Д.П., Лыкова Т.Б., Родионов А.Ю. Институциональные проблемы повышения энергоэффективности жилищного и бюджетного секторов. – М.: Фонд «Институт экономики города», 2010. – 8 с.

3. МДК 4-05.2004. Методика определения потребности в топливе, электрической энергии и воде при производстве и передаче тепловой энергии и теплоносителей в системах коммунального теплоснабжения. Утв. зам. председателя Госстроя России 12.08.03. – 9 с.

4. Методические рекомендации по оценке эффективности инвестиционных проектов. Утвержденные Министерством экономики РФ, Министерством Финансов РФ, Государственным комитетом РФ по строительной, архитектурной и жилищной политике № ВК 477 от 21 июня 1999 г. – 12 с.

5. СНиП 23-01-99. Строительная климатология. – 5 с.

6. О некоторых мерах по повышению энергетической и экологической эффективности российской экономики: Указ Президента РФ от 4 июня 2008 г. № 889.

ECONOMY OF THERMAL ENERGY IN SYSTEMS OF HEAT SUPPLY DUE TO AUTOMATIC CONTROL OF HEATCONSUMPTION

YU.N. ZVONAREVA*, YU.V. VANKOV**

*Branch LLC «KER-Enginiring» «TatNIPIenergoprom», Kazan

**FSBEI HPE «Kazan power-engineering university», Kazan

Annotation. It agrees 261-FZ «About energy saving and increase of energy efficiency», the accepted in November, 2009, Housing Code of the Russian Federation, the Resolution of the Government of the Russian Federation No. 307 «About an order of providing utilities to citizens» owners of housing have the right to regulate consumption of energy resources in the house

and to pay actually consumed quantity of resources for indications of metering devices.

Experience of the companies dealing with energy saving issues shows that high wear of the equipment and impossibility of pogodozavisimy regulation of giving of the heat carrier in system of heating of the building are the main reasons for inefficient use of energy resources from system of heating of the building.

Installation of individual heating stations (IHS) which directly located directly in building, in addition to creating temperature conditions indoors, reduces heat energy consumption.

In work economic problems of optimization of knots of system of heat supply on input to buildings by means of installation of the automated metering stations and regulation on input in system of heating are considered.

Key letters: individual heating stations, weather-compensated control, district energy flow, reduction of heat consumption, economic efficiency.

УДК 658.351

МОДЕЛИ НАДЕЖНОСТИ ДЛЯ КВАРТАЛЬНЫХ ТЕПЛОВЫХ СЕТЕЙ Г. КАЗАНИ

**Ю.В. ВАНЬКОВ, Ш.Г. ЗИГАНШИН, Т.О. ПОЛИТОВА,
Р.Р. САЛЯХОВА, А.О. МАЛАХОВ**

**ФГБОУ ВПО «Казанский государственный энергетический университет»,
г. Казань**

Аннотация: целью работы является построение и оценка адекватности модели надежности квартальных трубопроводов г. Казани по статистическим данным отказов тепловых сетей.

Ключевые слова: надежность, системы теплоснабжения, модели надежности, трубопроводы.

В связи с кризисным состоянием жилищно-коммунального комплекса, деятельность предприятий в этой сфере характеризуется высокими затратами, отсутствием экономических стимулов снижения издержек на производство услуг, неразвитостью конкуренции. Все это приводит к высокой степени износа основных фондов, неэффективной работе предприятий, большим потерям энергии, водных и других ресурсов.

Опыт эксплуатации тепловых сетей в России показывает, что контроль за реальными тепловыми потерями на них, как правило, не проводится, хотя в ряде случаев можно выявить, что до 50 % транспортируемой теплоты не доходит до потребителя из-за нарушения (отсутствия) теплоизоляции и утечек теплоносителя. Старение трубопроводов из-за коррозии происходит в 2–3 раза быстрее расчетных нормативов. Статистика показывает, что на каждые 100 км двухтрубных водяных сетей ежегодно выявляется около 30–40 повреждений.

Для обоснованного выбора объемов перекладки, ремонта трубопроводов необходимо уметь прогнозировать количество отказов трубопроводов с течением времени. В настоящее время известно несколько методик построения моделей надежности.

Для построения моделей были взяты данные по порывам на тепловых сетях и сетях горячего водоснабжения МУП «Казэнерго» за 2008–2013 годы.

По статистическим данным строится статистическая модель надежности, на основании которой строится теоретическая модель надежности.

Существует три метода, позволяющие строить модели надежности трубопроводов: 1) метод наименьших квадратов, 2) графический метод линий тренда, 3) метод экспоненциальной регрессии.

Первым этапом является построение вариационного ряда. Для этого необходимо даты и время отказов тепловых сетей расположить в порядке возрастания.

Вариационный ряд представляет собой ранжированную выборку, т. е. выборку, члены которой расположены в порядке возрастания численных значений. Полные наработки между отказами, входящие в выборку и, соответственно, в вариационный ряд, получают суммированием суточных наработок за период от окончания восстановления до ближайшего отказа объекта.

Для построения статистической модели надежности принимаем ширину интервала равную $\Delta t = 50$, а число интервалов 36.

Число отказов к моменту $n(t)$ (суммарное число отказов в текущем интервале, вычисленное для середины интервала).

На основании полученных данных количество всех отказов N вычисляется эмпирическая вероятность отказов для интервала $F_{ci}(t)$, по формуле:

$$F_{ci}(t) = \frac{n_i(t)}{N}, \quad (1)$$

где $n(t)$ – число отказов к моменту (суммарное число отказов в текущем интервале, вычисленное для середины интервала); i – номер интервала; N – суммарное количество всех наблюдений (число отказов за весь период наблюдения).

Исходя из положения, что полная группа событий равна 1, т. е. $F_{ci}(t) + P_3(t) = 1$, определяется распределение эмпирической функции надежности $P_3(t)$, таким образом, вычисляется ее значение на каждом интервале по известной формуле:

$$P_3(t) = 1 - F_{ci}(t). \quad (2)$$

Результаты расчёта статистической модели надёжности представлены в табл. 1.

1. На основании эмпирических данных построим теоретическую модель надежности в Microsoft Excel методом наименьших квадратов.

Выдвигаем гипотезу, что вероятность безотказной работы трубопровода имеет экспоненциальное распределение вида

$$P_1(t) = e^{-\lambda t}, \quad (3)$$

где $P_1(t)$ – вероятность безотказной работы трубопровода; t – время, сут; λ – интенсивность отказов, 1/сут; C – коэффициент.

Таблица 1

Результаты расчёта статистической модели надёжности
квартальных трубопроводов г. Казань за 2008–2013 гг.

| Интервалы t | Количество отказов по энергорайонам | | | | | t | $ni(t)$ | $F\tau(t)$ | $P_э(t)$ | N |
|---------------|-------------------------------------|-----|-----|-----|-----|------|---------|------------|----------|-----|
| | ВЭР | СЭР | ПЭР | ЗЭР | ДЭР | | | | | |
| 0–212 | 7 | 7 | 5 | 7 | 4 | 106 | 12 | 0,08333 | 0,91667 | 144 |
| 212–424 | 0 | 6 | 1 | 5 | 4 | 318 | 47 | 0,32639 | 0,67361 | 144 |
| 424–636 | 2 | 3 | 6 | 11 | 3 | 636 | 82,5 | 0,57292 | 0,42708 | 144 |
| 636–848 | 5 | 11 | 4 | 4 | 2 | 1060 | 111,5 | 0,77431 | 0,22569 | 144 |
| 848–1060 | 10 | 19 | 9 | 6 | 3 | 1590 | 136 | 0,94444 | 0,05556 | 144 |
| Итого | 24 | 46 | 25 | 33 | 16 | | | | | |

Для начала вводим исходные данные: значения середины временного интервала t_i ; значения статистических вероятностей безотказной работы $P_э(t)$. Вычислим сумму квадратов разностей Z между статистической и теоретической вероятности безотказной работы. Вычисление суммы квадратов разностей при начальном значении $\lambda = 0$ осуществим с помощью стандартной функции СУММКВРАЗН. Получаем $Z = 1,933232$.

Далее с помощью метода «Поиск решения» находим интенсивность отказов $\lambda = 0,00137$, при которой сумма квадратов разностей F будет минимальной:

$$\sum_{i=1}^n (P_{ci}(t) - e^{-\lambda t})^2 \rightarrow \min. \quad (4)$$

Получаем $\lambda = 0,00137$, при полученном значении интенсивности отказа, отличном от нуля, изменилось значение целевой функции (суммы квадратов разностей) $Z = 0,006876$.

В результате компьютерного моделирования методом наименьших квадратов мы получили теоретическую модель надёжности трубопровода:

$$P_1(t) = e^{-\lambda t} = e^{-0,00137t}$$

Результаты расчёта по методу наименьших квадратов представлены в виде графика (рис. 1).

2. При помощи исходных данных (значения середины временного интервала t_i ; значения статистических вероятностей безотказной работы

$P_c(t)$ построим точечный график. На этот же график строим линию тренда через контекстное меню «Добавить линию тренда». На графике также разместим функцию и коэффициент детерминации R^2 . Графики будут иметь следующий вид.

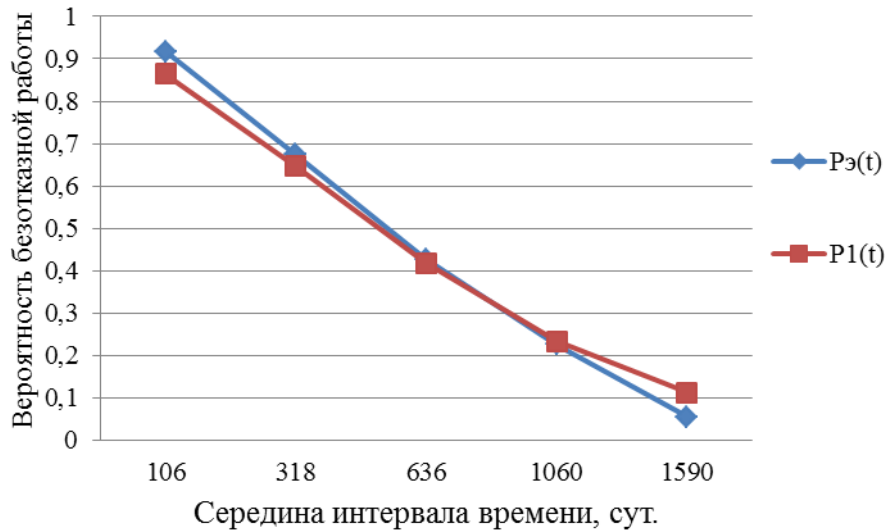


Рис. 1. Сравнение полученных вероятностей статистического анализа и метода наименьших квадратов

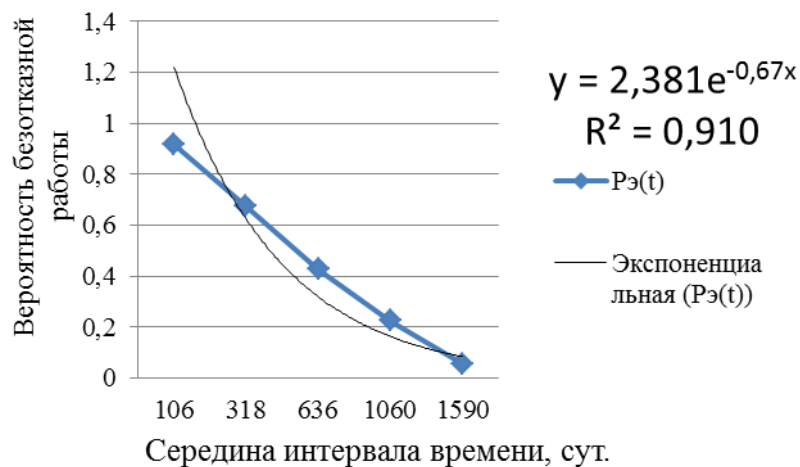


Рис. 2. Построение теоретической модели надежности графическим методом – построением линии тренда

На рис. 2 видно, что коэффициент детерминации входит в интервал от 0,9 до 1, поэтому эту модель можно принять как достоверную. Но так как интенсивность отказа по данной модели является слишком высокой (0,67), что не позволяет получить значения вероятности безотказной работы для данной модели, от неё пришлось отказаться.

3. Метод экспоненциальной регрессии позволяет получить полную статистику экспоненциальной регрессии, которая представляется в виде таблицы, состоящей из пяти строки двух колонок.

Выдвигаем гипотезу, что вероятность безотказной работы трубопровода имеет экспоненциальное распределение вида:

$$P_2(t) = e^{-\lambda t} \quad (5)$$

Для начала вводим исходные данные: значения середины временного интервала t_i ; значения статистических вероятностей безотказной работы $P_{ci}(t)$.

Вводим исходные данные: значения середины временного интервала t_i ; значения статистических вероятностей безотказной работы $P_{ci}(t)$.

С помощью статистической функции ЛГРФПРИБЛ путем ввода необходимых исходных данных получим в итоге при помощи данного метода получаем модель надежности магистрального теплопровода следующего вида:

$$P_2(t) = e^{-0,001845t} .$$

Сравнение полученных результатов по статистическим и теоретическим данным представлено на рис. 3.

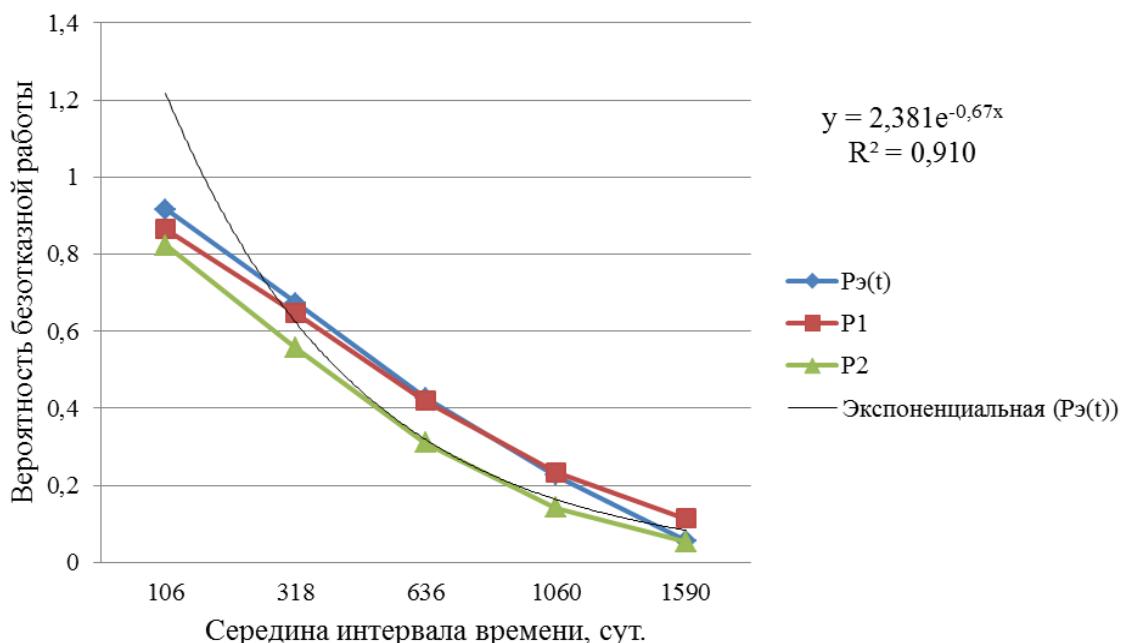


Рис. 3. Сравнение результатов

Важным показателем корреляционного анализа является коэффициент корреляции r_x .

В состав инженерного приложения Excel входит комплекс методов статистической обработки данных, который позволяет проводить анализ статистических данных. Комплекс методов представлен в виде пунктов меню «Анализ данных».

Для нахождения коэффициентов корреляции, воспользуемся методом «Корреляция». Вводим необходимые данные (табл. 2), а точнее значения статистических и теоретических вероятностей безотказной работы трех полученных моделей.

Таблица 2

Исходные данные

| $P_3(t)$ | P_1 | P_3 |
|----------|----------|----------|
| 0,916667 | 0,864876 | 0,822407 |
| 0,673611 | 0,646937 | 0,556239 |
| 0,427083 | 0,418527 | 0,309401 |
| 0,225694 | 0,234174 | 0,141537 |
| 0,055556 | 0,113321 | 0,053248 |

В результате получаем следующую таблицу.

Таблица 3

Значения приближенности теоретической модели к экспериментальной

| | $P_3(t)$ | P_1 | P_2 |
|----------|----------|----------|-------|
| $P_3(t)$ | 1 | | |
| P_1 | 0,999277 | 1 | |
| P_2 | 0,993668 | 0,996663 | 1 |

Из табл. видно, как коррелируют между собой модели надежности. Рассматриваем только первый столбик, так как нам интересен коэффициент корреляции между теоретической и статистической моделями.

Считается, что чем ближе коэффициент корреляции к 1, тем выше теснота связи между коррелируемыми величинами. Здесь ближе всего к 1 имеет коэффициент корреляции 0,999277. По шкале Чеддока (табл. 4) видно, что связь является весьма высокой.

Выбираем модель надежности, которая имеет следующий вид, графически представленная на рис. 4.

$$P_1(t) = e^{-\lambda t} = e^{-0,00137t}.$$

Шкала Чеддока

| Теснота связи | Значение коэффициента корреляции при наличии: | |
|----------------|---|----------------|
| | прямой связи | обратной связи |
| Слабая | 0,1–0,3 | (–0,1)–(–0,3) |
| Умеренная | 0,3–0,5 | (–0,3)–(–0,5) |
| Заметная | 0,5–0,7 | (–0,5)–(–0,7) |
| Высокая | 0,7–0,9 | (–0,7)–(–0,9) |
| Весьма высокая | 0,9–0,99 | (–0,9)–(–0,99) |

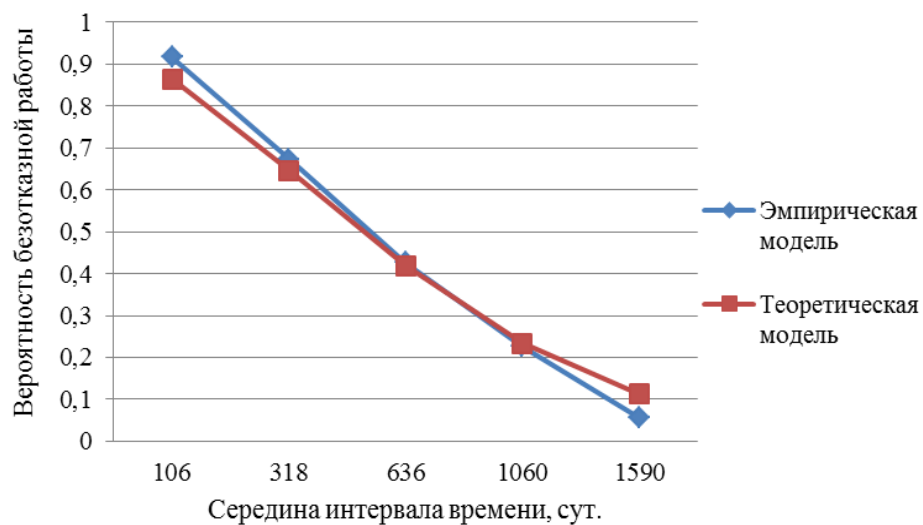


Рис. 4. Модель надежности тепловой сети

Первичной информацией являются данные по отказам тепловых сетей и сетей горячего водоснабжения по МУП «Казэнерго» за 2008–2013 гг.

В качестве инструмента обработки данных выбрана математическая среда Microsoft Excel, которая позволяет быстро обработать данные и составить модели надежности.

Проведён расчёт эмпирической вероятности безотказной работы и частоты отказа. По трём методам построены модели надёжности для тепловых сетей.

Методом корреляционного анализа по табл. 3 выяснили, что метод наименьших квадратов больше других приближен к эмпирической модели. Следовательно, данный метод можно использовать для построения теоретических моделей энергетических районов города Казань.

Список литературы

1. Дейнеко С.В. Обеспечение надежности систем трубопроводного транспорта нефти и газа. – М.: Изд-во «Техника», ТУМА ГРУПП, 2011. – 176 с.
2. Дейнеко С.В. Построение моделей газонефтепроводов методом компьютерного моделирования: Лабор. практикум. – М., 2007.
3. Ионнин А.А. Надежность систем тепловых сетей. – М.: Стройиздат, 1989. – 268 с.
4. Сухарев М.Г. Математическая теория надежности и ее инженерные приложения: Учеб. пособие. – М.: РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2005. – 61 с.
5. Грачев В.В., Щербаков С.Г., Яковлев Е.И. Надежность магистральных газопроводов: Учеб. пособие. – М.: МИНХ и ГП им. И.М. Губкина, 1982. – 81 с.
6. Зоненко В.И., Шибнев А.В., Яковлев Е.И. Эксплуатационная надежность магистральных трубопроводов. – М.: МИНГ им. И.М. Губкина, 1989. – 91 с.
7. Промышленная безопасность магистрального трубопроводного транспорта: Учеб. пособие / Под ред. А.И. Владимирова, В.Я. Кершенбаума. – Национальный институт нефти и газа. – 2005.

RELIABILITY MODELS FOR QUARTERLY THERMAL NETWORKS KAZAN

YU.V. VANYKOV, W.G. ZIGANSHIN, T.O. POLITOVA,
R.R. SALIYAKHOVA, A.O. MALAKHOV
FSBEI NPE «Kazan power-engineering university», Kazan

Annotation. The aim of this work is the construction and evaluation of the adequacy of the model the reliability of quarterly pipeline of Kazan according to the statistics of failures of heat networks.

Keywords: reliability, heat supply systems, reliability models, pipelines.

СОДЕРЖАНИЕ

СЕКЦИЯ 4. ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ, ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ И ИМПОРТОЗАМЕЩЕНИЕ В ТОПЛИВНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКОМ КОМПЛЕКСЕ

| | |
|---|----|
| Лаптев А.Г., Дударовская О.Г., Фарахов Т.М. | |
| Использование хаотичного насадочного слоя в качестве интенсификатора проводимых процессов | 3 |
| Емельянов И.И., Зиятдинов Н.Н., Островский Г.М. | |
| Теплоинтеграция в системах простых ректификационных колонн на основе модификации задачи о назначениях | 8 |
| Мингалеева Г.Р., Гайнетдинов А.В., Шакиров Р.Р., Ахметов Э.А. | |
| Сравнительный анализ способов снижения вязкости водоугольных топлив | 16 |
| Бухмиров В.В., Гаськов А.К. | |
| Исследование теплопроводности энергосберегающих красок. . . | 23 |
| Ковальногов В.Н., Федоров Р.В., Генералов Д.А. | |
| Разработка эффективных способов повышения экономичности работы газовых турбин | 29 |
| Николаева Л.А., Хамзина Д.А. | |
| Ресурсосберегающая технология утилизации «замазученного» шлама химводоочистки ТЭС | 37 |
| Лаптев А.Г., Исхаков А.Р. | |
| Исследование турбулентной миграции частиц на каплю в полых распыливающих газосепараторах | 41 |
| Николаева Л.А., Исхакова Р.Я., Зарипова Г.М. | |
| Энергоресурсосбережение при вторичном использовании карбонатного шлама ТЭС и активного ила биологической очистной станции | 48 |
| Лаптева Е.А., Ишмуратова Л.М., Лаптев А.Г. | |
| Энергетические и тепломассообменные характеристики пленочных блоков оросителей в градирнях | 54 |
| Кашаев Р.С., Масиаб А.Г.Н., Хуснияров А. | |
| Термоэлектрический генератор | 61 |
| Козелков О.В., Кашаев Р.С., Нургалиева А.Р. | |
| Энергоснабжение котельной топливной эмульсией | 70 |
| Лаптев А.Г., Фарахов М.И., Башаров М.М. | |
| Повышение эффективности процессов и энергосберегающие модернизации промышленных аппаратов разделения смесей | 78 |

| | |
|--|-----|
| Лаптева Е.А., Хамидуллина Г.К. Определение коэффициентов теплоотдачи в турбулентных пленках | 87 |
| Малёв Н.А., Погодицкий О.В., Львова Т.Н., Тукаева Е.П. Синтез высокоточных систем управления электроприводов с применением MATLAB SIMULINK | 95 |
| Кашаев Р.С., Матвеев М.В., Шипилов И.А. Проточные электрогенераторы | 102 |
| Смоляков Б.П., Шигапов А.А. Применение нелинейных способов управления для повышения энергоэффективности асинхронного электропривода | 114 |
| Загоскин С.Н., Соковнин О.М. Оценка нижней границы автомодельного режима течения жидкости в измерительном сужающем устройстве | 123 |
| Садыков Ж.Д., Мансуров А.А., Тилавов Ю.С., Дамаев Н.К., Ураков К.Х., Эшкobilов О.Х. Использование пассивной солнечной системы для теплоснабжения сельскохозяйственных сооружений | 128 |
| Синельников Д.С., Щинников П.А. Методика оценки технико-экономической эффективности установок на базе ДВС с воздушным охлаждением и когенерацией .. | 135 |
| Закиров Р.Н., Чичирова Н.Д., Чичиров А.А. К вопросу снижения себестоимости тепловой энергии от котельных жилых микрорайонов на стадии проектирования | 143 |
| Дремичева Е.С. Оценка эффективности сорбционных материалов для ликвидации разливов нефтепродуктов | 149 |
| Дмитриев А.В., Дмитриева О.С., Мадышев И.Н. Перспективы использования струйно-барботажных контактных устройств для повышения энергоэффективности тепломассообменных аппаратов | 153 |
| Хасанова Д.И., Сафин Д.Х., Коврижных Е.А. Экологически безопасные ингибиторы для систем водооборота нефтехимических производств | 160 |
| Николаева Л.А., Голубчиков М.А. Сорбционные материалы для очистки сточных вод промышленных предприятий от нефтепродуктов отходом водоподготовки КТЭЦ-1 | 170 |

СЕКЦИЯ 5. КРУГЛЫЙ СТОЛ. СИСТЕМЫ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ

| | |
|--|-----|
| Мельников В.М., Рачков М.Р. | |
| Совершенствование схем теплоснабжения муниципальных образований | 181 |
| Мельников В.М., Пурим М.В. | |
| Методика проектирования индивидуального теплового пункта общественного здания | 189 |
| Мустафина Р.М. | |
| Повышение энергоэффективности обратного водоснабжения при использовании теплового метода системы поддержания пластового давления | 201 |
| Половников В.Ю. | |
| Тепловые потери в тепловых сетях в условиях затопления | 207 |
| Виноградов А.С., Чичиров А.А., Чичирова Н.Д. | |
| Проблемы теплоснабжения | 213 |
| Звонарева Ю.Н., Ваньков Ю.В. | |
| Экономия тепловой энергии в системах теплоснабжения за счет автоматического регулирования теплопотребления | 223 |
| Ваньков Ю.В., Зиганшин Ш.Г., Политова Т.О., Саляхова Р.Р., Малахов А.О. | |
| Модели надежности для квартальных тепловых сетей г. Казани | 229 |

Научное издание

IX СЕМИНАР ВУЗОВ ПО ТЕПЛОФИЗИКЕ И ЭНЕРГЕТИКЕ

МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ

21–24 октября 2015 года

г. Казань, Россия

Сборник материалов докладов

В четырех томах

Том IV

Компьютерная верстка: *М.С. Беркутова*

Дизайн обложки: *Ю.Ф. Мухаметшина*

Подписано в печать 19.10.15.

Формат 60x84/16. Гарнитура Times. Вид печати РОМ.

Усл. печ. л. 14,1. Уч.-изд. л. 15,6.

Тираж 500 экз. Заказ № 4967.

Редакционно-издательский отдел КГЭУ,
420066, Казань, Красносельская, 51