

**Министерство науки и образования РФ
Российская Академия наук
Российская академия ракетных и артиллерийских наук
Национальный комитет по тепломассообмену РАН
Балтийский государственный технический университет
«Военмех» им. Д.Ф.Устинова**

**Посвящается памяти
Е.В. Чурбанова**

**Фундаментальные основы
баллистического проектирования**

Всероссийская
научно-техническая конференция

Санкт-Петербург, 28 июня – 2 июля 2010

**СБОРНИК ТРУДОВ
В двух томах
Том II**

Санкт-Петербург
2011

УДК 531.5+623.5

Всероссийская научно-техническая конференция «Фундаментальные основы баллистического проектирования». Санкт-Петербург, 28 июня – 2 июля 2010 г. Сборник трудов. В 2 томах. Том 2 / Под ред. д.т.н. проф. Кэрта Б.Э. – СПб.: Балт. гос. техн. ун-т, 2011 .- 176с.

ISBN 978-5-85546-542-6

Публикуются материалы докладов, представленных на Вторую Всероссийскую научно-техническую конференцию «Фундаментальные основы баллистического проектирования» (г. Санкт-Петербург, 28 июня – 2 июля 2010 г.). Рассматриваются проблемы связанные с проектированием современных средств поражения и боеприпасов, включая внутреннюю, внешнюю и конечную баллистику, динамику процессов выстрела и старта, прочность конструкций, эффективность действия, принципы работы информационных, управляющих и иницирующих систем, компьютерные технологии и средства проектирования, технологии производства, хранения и утилизации.

ISBN 978-5-85546-542-6

© БГТУ, 2011
© ООО «УНПЦ Комтех», 2011
© Авторы, 2011

Организаторы конференции

Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф.Устинова; Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана; Тульский государственный университет; Национальный Исследовательский Томский Политехнический университет; Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники; Институт автоматизации проектирования РАН; Институт проблем механики РАН; Институт проблем химической физики РАН; Институт химической физики РАН им. Н.Н.Семенова; Институт механики МГУ; Институт математики, экономики и информатики Иркутского госуниверситета; Российский федеральный ядерный центр – ВНИИ экспериментальной физики; НИИ механики ННГУ; НИИ прикладной математики и механики при Томском госуниверситете; ЗАО «Специальное конструкторское бюро»; ОАО «ЦНИИ «Буревестник»; ОАО «ЦНИИ специального машиностроения»; ФГУП «Государственное научно - производственное предприятие «СПЛАВ»; ФГУП «КБ Машиностроения»; ГУП «КБ Приборостроения»; ФГУП "Конструкторское бюро точного машиностроения имени А.Э. Нудельмана"; ФКП Нижнетагильский институт испытания металлов; ФГУП «НИИ полимерных материалов»; ФГУП "ФНПЦ "Прибор"; ФГУП Центральный аэрогидродинамический институт им. профессора Н. Е. Жуковского; Научно-образовательный центр систем вооружений БГТУ "Военмех"; ООО «Учебно-научно-производственный центр компьютерных технологий».

Президиум - научный комитет конференции

Авенян В.А., Баженов В.Г., Белоцерковский О.М., Берлин А.А., Волчихин В.И., Вишневский В.С., Денежкин Г.А., Еремин С.В., Забродин А.В., Закаменных Г.И., Зеленцов В.В., Кашин В.М., Круглов Ю.А., Крылов В.М., Леонтьев А.И., Липанов А.М., Лысенко Л.Н., Макаровец Н.А., Милехин Ю.М., Михайлов Ю.М., Окунев Ю.М., Панов В.В., Пашин В.М., Петров В.А., Платонов Н.А., Полежаев Ю.В., Рахматуллин Р.Ш., Руденко В.Л., Рыбас А.Л., Рыкованов Г.Н., Садовничий В.А., Селиванов В.В., Сильников М.В., Соловьев В.С., Степанов В.В., Толпегин О.А., Файков Ю.И., Фролов Ю.В., Черный Г.Г., Четверушкин Б.Н., Чижевский О.Т., Чуков А.Н., Шалыгин А.С., Шипунов А.Г.

Сопредседатели конференции

**Иванов К.М., Кэрт Б.Э., Леонтьев А.И., Макаровец Н.А.,
Панов В.В., Потапов А.В., Чижевский О.Т.**

Программный комитет конференции

Агошков О.Г., Алиев А.В., Ассовский И.Г., Белов А.В., Бородавкин В.А., Ваулин С.Д., Виноградов Ю.А., Велданов В.А., Гувернюк С.В., Егоренков Л.С., Емельянов В.Н., Есиев Р.У., Захаренков В.Ф., Исаев С.А., Ищенко А.Н., Каширкин А.А., Козлов Е.А., Козлов В.И., Кэрт Б.Э., Ладов С.В., Ларионов Б.И., Мелешко В.Ю., Могилев В.А., Могильников Н.В., Остапенко Н.А., Павловец Г.Я., Петров Е.Н., Пилюгин Н.Н., Пинчук В.А., Поляков Е.П., Самсонов В.А., Семашкин Е.Н., Тирский Г.А., Хмельников Е.А., Хорев И.Е., Швыкин Ю.С., Шевелев Ю.Д., Шишков А.А., Ягодников Д.А.

Оргкомитет конференции

Кэрт Борис Эвальдович (председатель), Знаменский Евгений Александрович (*ученый секретарь*), Веричева Елена Владимировна (*секретарь*), Водопьянов М.Я., Генкин Ю.В., Виноградов Ю.А., Князева И.В., Максимов Ф.А., Поляков Е.П., Понятский В.М., Хлебников В.С., Хмельников Е.А.

Спонсоры конференции :

БГТУ «Военмех» им. Д.Ф.Устинова;
ВА РВСН им. Петра Великого;
ГУП «КБ Приборостроения;
ФГУП «ГНПП «Сплав»;
ФГУП «ФНПЦ «Прибор»;
ФКП НТИИМ;
ООО «УНПЦ Комтех»

Попечительский Совет конференции

Иванов К.М., ректор БГТУ «Военмех»; **Мелешко В.Ю.**, начальник НИЛ ВА РВСН им. Петра Великого; **Степаничев И.В.**, и.о. генерального директора ГУП «КБ Приборостроения»; **Макаровец Н.А.**, ген. директор и ген. конструктор ФГУП «ГНПП «Сплав»; **Чижевский О.Т.**, ген. директор и ген. конструктор ФГУП «ФНПЦ «Прибор»; **Руденко В.Л.**, ген.директор ФКП НТИИМ; **Кэрт Б.Э.**, директор ООО «УНПЦ Комтех».

ПАМЯТИ Е.В.ЧУРБАНОВА



Евгений Васильевич Чурбанов скончался 27 декабря 2011 года. Известный учёный, представитель “могучей кучки” российских баллистиков классической школы (Н.Ф. Дроздов, И.П. Граве, М.Е. Серебряков, В.Е. Слухоцкий, М.А. Мамонтов, Б.Н. Окунев, М.С. Горохов и др.).

Евгений Васильевич Чурбанов родился 3 марта 1923 г. в посёлке Кривна Ногинского района Московской области в семье служащих текстильной фабрики. Окончив с отличием среднюю школу в 1940 г., поступил вне конкурса в МВТУ им. Баумана на факультет Точной механики и оптики. После двух лет обучения, уже во время Великой Отечественной войны, был призван в Красную армию и направлен в Третье пехотное училище в г. Ленинграде. Через три месяца (1942 г.) был переведен в Ленинградское артиллерийско-техническое училище, которое в то время находилось в г. Ижевске. В том же 1942 г. был переведен в Артиллерийскую академию им. Ф. Э. Дзержинского, в г. Самарканд. Окончил Академию в 1946 г. по факультету Боеприпасов и был направлен на работу в ЦКБ–34, которым руководил генерал-лейтенант И.И. Иванов. Темой дипломного проекта, руководителем которого был известный баллистик, генерал-майор инженерно-технической службы Михаил Евгеньевич Серебряков, была “*Баллистическое проектирование морских орудий*”. В 1947 г. Евгений Васильевич поступил в адъюнктуру Военно-морской академии вооружения и кораблестроения им. А.Н. Крылова на кафедру баллистики, которую возглавлял Б.Н. Окунев. В 1951 году Е.В. Чурбанов защитил кандидатскую диссертацию на тему “*Орудие наибольшего могущества с учетом природы пороха и давления форсирования*”, и стал преподавателем этой же кафедры, на которой проработал до 1959 г.

В 1956 г. Е.В. Чурбанов женился, вырастил троих детей. Одного из сыновей он в честь своего учителя профессора Серебрякова назвал Михаилом.

Активная научная деятельность Е.В. Чурбанова началась в 1953 г., когда он принял участие, под руководством генерала Сергея Ивановича Ермолаева, в разработке теории поправок внутренней баллистики и составлении таблиц поправочных коэффициентов. При выполнении этой работы капитан Е.В. Чурбанов руководил разработкой математических

моделей и проведением расчетов, которые в то время проводились женщинами-расчетчицами на арифмометрах типа “Феликс”. Результаты работы были опубликованы в 1956 г. в книге С. И. Ермолаева, Л. Б. Комарова, Е. В. Чурбанова “*Поправочные формулы внутренней баллистики*”. В 1958 г. Евгением Васильевичем был опубликован учебник “*Внешняя баллистика*”.

Во время защиты кандидатской диссертации, после вопроса профессора адмирала Бориса Дмитриевича Яшнова “*Что такое давление форсирования?*,” Евгения Васильевич заинтересовался этим вопросом, в то время еще совсем не изученным. В 1956 г. он впервые разработал способ учета давления форсирования при решении баллистических задач, и с тех пор стал собирать данные и разрабатывать теорию форсирования. В 1960 г. перешел на службу в Артакадемию им. М.И. Калинина, на кафедру крылатых ракет, где читал лекции по теории двигателей ракеты П5. В этом же году получил звание «полковник». В 1964 г. Евгений Васильевич перешел на кафедру артиллерийского вооружения, читал курс лекций “*Проектирование боеприпасов*”. По этому курсу в 1967 г. совместно с Василием Петровичем Васецким опубликовал книгу “*Боеприпасы наземной артиллерии*”. В это же время он читал курс “*Внешняя баллистика*” для иностранных слушателей инженерного факультета и в 1974 г. опубликовал книгу “*Внешняя баллистика*”. Параллельно продолжал работу над докторской диссертацией на тему “*Внутренняя баллистика периода форсирования и ее приложение к проектированию наземной артиллерии*”, которую защитил в 1972 г. В 1975 г. Евгению Васильевичу присвоена ученая степень доктора технических наук. В том же году в Академии он издает учебник “*Внутренняя баллистика*”.

В 1978 г. Академия переориентировалась на подготовку командного состава, прекратив подготовку инженеров. В связи с этим, в этом же году Евгений Васильевич ушел в отставку, и был принят на работу в Ленинградский механический институт (ныне Балтийский государственный технический университет «Военмех» им. Д.Ф. Устинова), где проработал до 2001 г. профессором кафедры «Средства поражения и боеприпасы».

За время работы в БГТУ написал ряд учебников и учебных пособий. В том числе: Краткий курс баллистики, статьи по активным воздействиям на гидрометеорологические процессы и баллистическим техническим устройствам.

Труды Евгения Васильевича Чурбанова по внутренней и внешней баллистике до сих пор пользуются заслуженным вниманием научного сообщества, студентов и аспирантов в России и за рубежом.

Проф., д.т.н. В.Ф. Захаренков. Написано автором по результатам личной беседы с Е.В. Чурбановым в апреле 2004 г.

Фундаментальные основы баллистического проектирования
2010

Секция 4

Взрыв, удар, защита



ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ ЛЬДА ПРИ УДАРНЫХ И ВЗРЫВНЫХ НАГРУЗКАХ

ГЛАЗЫРИН В.П., ОРЛОВ М.Ю., ОРЛОВА Ю.Н.*

Обособленное структурное подразделение "Научно-исследовательский институт прикладной математики и механики Томского госуниверситета"
634057, г. Томск, пр. Ленина, 36, корп. 10.

8-(3822)-529-569, факс. 8-(3822)-529-547, E-mail: orloff_m@mail.ru

*Национальный Исследовательский Томский Политехнический университет
634050, г. Томск, пр. Ленина, 30, корп.15
8-(3822)-42-62-70, E-mail: orlovaun@mail.ru

Актуальность исследований по динамическому нагружению пресноводного и морского льда связана с проведением геолого-разведывательных работ по добычи природных ископаемых в районах вечной мерзлоты, проектированием портов в замерзающих морях северных и восточных широт, созданием новых способов борьбы с ледяными заторами, отработкой ракетно-артиллерийского вооружения в ледяных пустынях Арктики и Антарктики и т.п.[1, 2].

Лед является уникальным по своей природе материалом, его физико-механические свойства зависят от способов заморозки, времени и температуры, а деформирование часто сопровождается фазовыми переходами. С точки зрения разрушения, этот древнейший природный материал вообще может не иметь аналогов. Все это затрудняет построение определяющих соотношений, описывающих процессы его деформирования [3].

С целью расширения теоретических знаний о поведении льда в широком диапазоне определяющих параметров и начальных условий нагружения была проведена серия вычислительных экспериментов по его ударно-взрывному нагружению.

Объектом исследования был выбран поликристаллический кожеляционный лед, полученный путем заморозки пресной воды в климатической камере при температуре -17°C и времени заморозки более суток. Предметом исследования являлось его осесимметричное напряженно-деформированное и термодинамическое состояние в различные моменты времени.

Лед моделировался повреждаемой, пористой упругопластической средой без фазовых переходов с усредненными физико-механическими характеристиками, приведенными в общедоступных источниках литературы. Уравнение состояния льда принято в следующем виде:

$$P(\rho) = B (\rho/\rho_0 - 1)(\rho/\rho_0)^2$$

где $B = 8,4$ ГПа, $\rho_0 = 0,92$ г/см³.

Действие взрывного нагружения на лед задается в приближении модели мгновенной детонации заряда взрывчатого вещества (ВВ). Уравнение состояния продуктов детонации (ПД) выбрано в виде политропы Ландау–Станюковича:

$$P = \rho_0 D^2 \left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^3 / 8,$$

где D – скорость детонации, ρ , ρ_0 – текущая и начальная плотность.

В качестве основного инструмента исследований использовался метод Джонсона (G.R. Johnson), расчетная часть которого дополнена механизмами расщепления расчетных узлов и разрушения расчетных элементов. Оригинальность метода заключается в том, что он содержит новый способ выделения поверхностей разрыва сплошности материала, не накладывающий серьезных ограничений на решение динамических много-контактных задач механики деформируемого твердого тела.

Для интегральной количественной оценки разрушений во льду введен параметр его поврежденности D , который подсчитывает относительное число узлов триангуляционной сетки лежащих на образовавшейся вследствие разрушений свободной поверхности ($D = 0$ при отсутствии разрушений и $D = 1$ при полном разрушен/ии).

В двумерной осесимметричной постановке при помощи суперкомпьютера «СКИФ-Suberia» на программе для ЭВМ "Удар. ОС1. Осесимметричная задача" решены следующие прикладные задачи [4]:

1. Расчет нормального внедрения компактных ударников в лед, расположенного на воде

Вначале решена задача соударения крупногабаритного ударника с ледовой пластиной лежащей на воде. Ударник состоит из стальной оболочки наполненной взрывчатым веществом (ВВ). Корпус ударника выполнен из прочной стали толщиной в цилиндрической части 15 мм. Внешний диаметр оболочки 48 см, длина 110 см, толщина стенки в цилиндрической части 1.5 см. Материал оболочки сталь плотностью 7.85 г/см³, модуль сдвига 80 ГПа, предел текучести 0.6 ГПа. Внутри оболочка заполнена взрывчатым веществом типа тринитротолуола (ТНТ): плотность 1.6 г/см³, модуль сдвига 11.5 ГПа, предел текучести 0.2 ГПа, скорость детонации 6.9 км/с. Масса ударника 440 кг, начальная скорость 150 м/с.

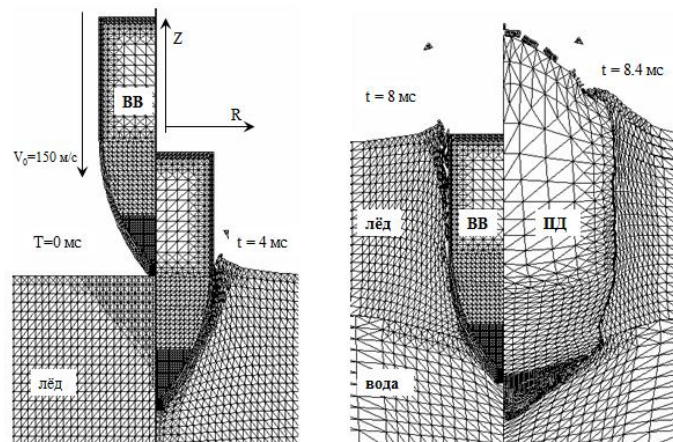


Рисунок 1 – Исходные и конечные конфигурации системы «ударник – лёд – вода»

На рис. 1 изображено конечно-элементное разбиение расчетной области. В процессе счета было установлено, что внедрение ударника в лёд сопровождалось разрушением льда вокруг образующегося кратера, причем форма кратера повторяла форму ударника. Когда дно ударника поравнялось с поверхностью льда (8 мс), осуществляется «подрыв» ВВ. В дальнейшем процесс разрушения ледовой пластины был вызван действием на нее продуктов детонации. Диаметр кратера через 0,5 мс после детонации ВВ увеличился примерно вдвое и составил в средней части 110 см. В верхней части льда появляются отрывные разрушения, которые отсутствуют в нижней части льда. Это объясняется наличием слоя воды, препятствующего появлению достаточных для разрушения растягивающих напряжений. Расчет проводился до момента времени равным 9,5 мкс, тогда диаметр кратера в средней части составил примерно 180 см, т.е. после детонации ВВ увеличился более чем в три раза, лёд вокруг кратера значительно разрушился и часть его выброшена продуктами детонации наружу.

2. Расчет процесса внедрения крупногабаритного ударника, наполненного ВВ в лёд расположенный на водной и гранитной подложках

Физическая постановка следующей задачи формулируется как контактное взаимодействие рассмотренного в п.1. крупногабаритного ударника, наполненного ВВ в лёд, лежащий в одном случае на гранитной, а в другом на водной подложках.

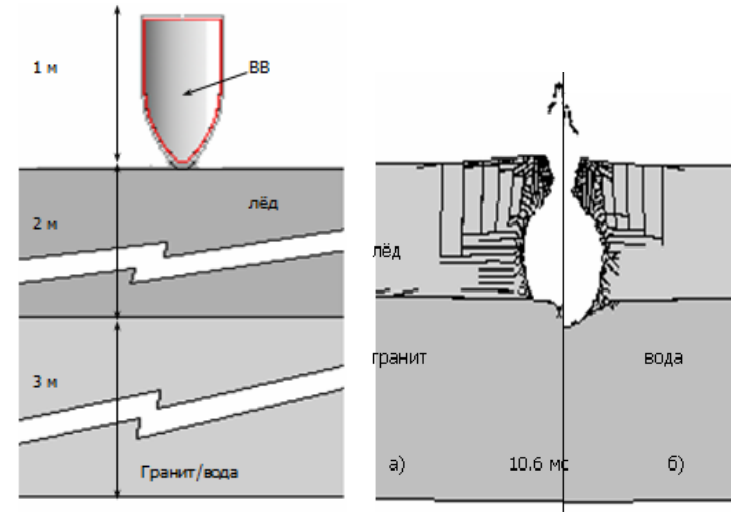


Рисунок 2 –

Сравнение разрушений льда в результате ударно-взрывного нагружения преград лёд+вода и лёд+гранит показывает, что в последнем случае разрушений гораздо больше (рис.2, а, б). Это можно объяснить тем, что амплитуда волны сжатия от контактной границы лёд-гранит выше, чем от границы лёд-вода, вследствие большего акустического импеданса гранита по сравнению с акустическим импедансом воды. При этом разрушения в граните незначительны.

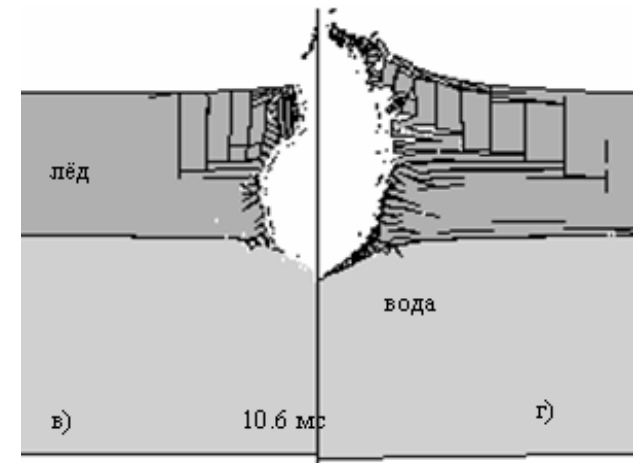


Рисунок 2 – Расчет процесса разрушения льда в зависимости от глубины ударника

На рис.2 *в,г* приведено сравнение разрушений льда в зависимости от глубины расположения ударника в момент взрыва. На рисунках видно, что при взрыве ударника в середине пластины (рис.2г) разрушений больше, чем при его взрыве на границе раздела лёд-вода. Расчет, проведённый для выявления действия проникания ударника без детонации наполнителя, показал, что запреградная скорость ударника равна 150 м/с.

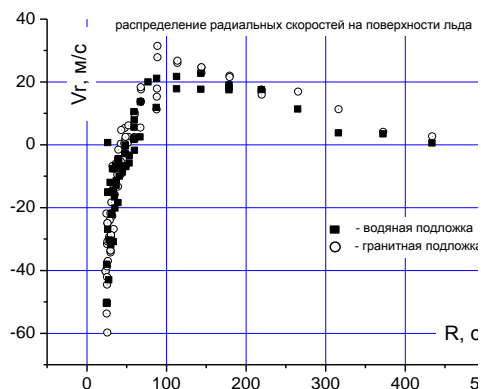


Рисунок 3 – Радиальные (а) и осевые (б) скорости свободной поверхности ледяной пластины

Оценить волну сжатия, вызванную взрывом, и соответствующую ей волну разгрузки можно по скорости свободной поверхности льда, графики которой приведены на рис.3. Радиальные составляющие скорости свободной поверхности льда в вариантах для водной и гранитной подложки отличаются мало, а осевые составляющие отличаются на 20 м/с. Это подтверждает уже высказанное предположение о более интенсивной отраженной волне от гранитной подложки. Рассчитанное давление в подложке фиксировалось на глубине 1 м от границы раздела. В воде оно составило 0.1 ГПа, в граните 0.16 ГПа.

3. Задача нормального внедрения компактных ударников в лед в дозвуковом диапазоне скоростей

В завершение была проведена серия вычислительных экспериментов по ударному нагружению ледяной пластины компактными ударниками в диапазоне начальных скоростей удара ниже скорости звука в воздухе.

Компактные стальные ударники одинаковые по массе имели цилиндрическую и сферическую форму: прямой круговой цилиндр размерами в сечении (5×5) мм и стальная сфера диаметром $d = 5,82$ мм. Начальная скорость ударника варьировалась от 50 до 325 м/с.

Расчетным путем установлено, что первые очаги разрушения формировались во льду уже на 2-й мкс процесса внедрения (рис.4). Поэтому ударник внедряется в уже ослабленный материал, причем после 4-й микросекунды на расстоянии приблизительно 3-х мм от свободной поверхности очаги разрушения сливаются в магистральную трещину. На более поздних стадиях процесс внедрения ударника не сопровождался существенным изменением деформационных картин и областей разрушения льда. Расчетами показано, что при более высоких скоростях (вариант №9-12) ледовая пластина также разрушается вблизи своей тыльной и боковой поверхностей. Отличительной особенностью низких скоростей внедрения (вариант №6-8) является то, что к окончанию процесса зона разрушений льда имела форму конуса.

Выявлено, что процесс разрушения льда при действии сферического ударника также имел многоочаговый характер. На начальной стадии внедрения первыми появлялись очаги разрушения в зоне контакта «ударник – лед», затем в средней части пластины и к окончанию процесса – вблизи ее тыльной поверхности.

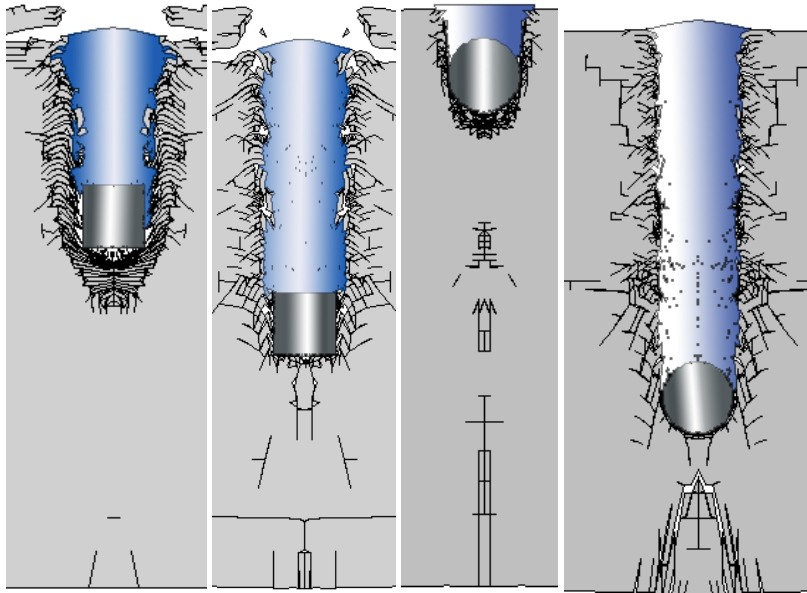


Рисунок 4 – Рассчитанные конфигурации «ударник – мишень»

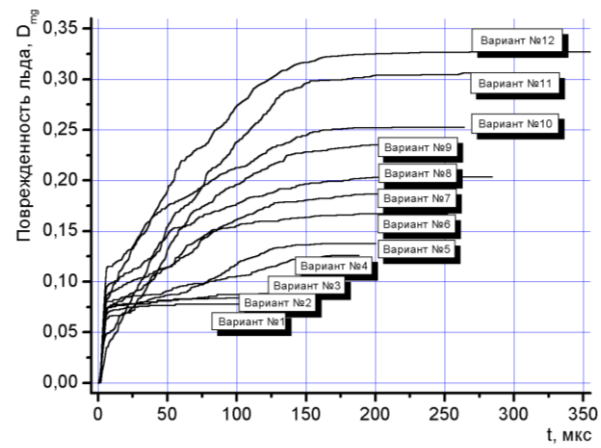


Рисунок 5 – Зависимость поврежденности льда от времени при действии цилиндрического ударника

Номер варианта	Начальная скорость V_0	Время внедрения t_k	Глубина внедрения L_k	Поврежденность D_{mg}	ОТКОЛ	
					Лицевой	Тыльный
1	50	85/118	1,7/2,8	7,76/3,20	- / -	- / -
2	75	101/139	3,0/5,4	8,4/4,91	- / -	- / -
3	100	140/185	5,0/8,0	8,9/6,55	- / -	- / -
4	125	184/200	8,33/1,04	12,6/8,0	- / -	- / -
5	150	199/216	11,5/12,9	13,7/8,35	- / -	- / -
6	175	215/241	14,2/16,6	16,7/12,47	- / -	- / -
7	200	225/255	16,2/20,3	18,6/16,9	+ / -	- / -
8	225	230/272	18,3/23,8	20,3/19,15	+ / -	- / -
9	250	235/281	20,5/26,7	23,5/21,37	+ / -	- / -
10	275	265/295	23,9/30,5	25,2/23,67	+ / -	- / -
11	300	275/301	27,8/32,?	30,6/26,86	+ / -	+ / +
12	325	285/313	29,8/35,9	32,7/28,10	+ / -	+ / +

Были проанализированы графики зависимостей скорости центра масс ударников от времени, которые в обоих случаях были близки к линейному. Развитие поврежденностей во льду при действии цилиндрического и сферического ударников проходило на первых микросекундах внедрения. Отличительная особенность заключалась в том, что при действии цилиндрического ударника на кривых поврежденностей имелись «ступеньки» обусловленные формированием зоны разрушения в зоне контакта «ударник - мишень» (рис.5).

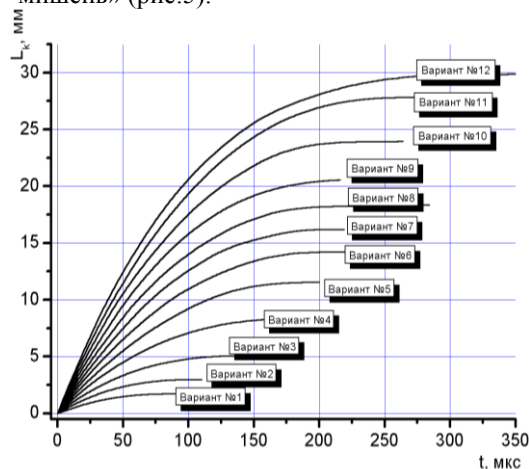


Рисунок 6 – Зависимость глубины цилиндрического ударника от времени

На рис.6 показаны графические зависимости глубины внедрения цилиндрического ударника от времени.

Результаты расчетов действия компактных ударников в дозвуковом диапазоне по льду суммированы в таблице (в числителе указаны числовые значения для цилиндрического, а в знаменателе для сферического ударников). В процессе счета регистрировалось время процесса внедрения t_k , глубина внедрения ударника L_k и поврежденность льда D_{mg} .

Из таблицы видно, что время процесса внедрения компактных ударников в лед в дозвуковом диапазоне скоростей не превысило 1/3 миллисекунды, причем цилиндрический ударник внедрялся быстрее, чем сферический. Наибольшее время внедрения зафиксировано в варианте №12 для сферического ударника. Наименьшее время процесса внедрения отмечено в варианте №1 для цилиндрического ударника.

Расчетным путем установлено, что в рассмотренном диапазоне скоростей ударники смогли внедриться в лед на глубину практически равную 2/3 высоты пластины, причем сферический ударник внедрялся глубже, чем цилиндрический. Наибольшая глубина внедрения зафиксирована в

варианте №12, а наименьшая – варианте №1.

Показано, что наибольшие разрушения льда при действии ударников достигали практически 1/3 его объема. Установлено, что при действии цилиндрического ударника лед разрушался больше, чем при действии сферического. Наибольший объем зафиксирован в варианте №12, а наименьший – варианте №1.

Таким образом используемая расчетно-математическая модель позволила детально проследить по времени процессы деформирования и разрушения льда при его ударно-волновом нагружении. Результаты расчетов соответствуют общефизическим представлениям и качественно согласуются с экспериментальными данными.

Работа выполнялась при поддержке АВЦ программы МинОбрНауки (проект РНП 2.1.2.2509), гранта Президента РФ МК-2565.2009.8, а также гранта РФФИ 10-08-00398а, 10-08-00633а.

ЛИТЕРАТУРА

1. Физика и механика льда: Пер. с англ./Под ред. П. Трюде. – М.: Мир, 1983, с. 352.
2. Глазырин В.П., Орлов М.Ю., Орлов Ю.Н. Разрушение льда под действием продуктов детонации ВВ // Известия вузов. Физика. – 2008. – Т.51. – №8/2. С.136-142.
3. Глазырин В.П., Орлов Ю.Н., Орлов М.Ю. Разрушение льда при ударном и взрывном нагружении // Вычислительные технологии. – 2008. – Т.13, – Ч.1, Спец.Выпуск. – С. 425-432.
4. Орлов Ю.Н., Глазырин В.П., Орлов М.Ю. Программа для ЭВМ «Удар ОС.1. Ударно-волновое нагружение конструкций. Осесимметричная задача» // Российское агентство по патентам и товарным знакам: Свидетельство об официальной регистрации программ для ЭВМ №2010610911. – М. 2010.

О МЕХАНИЧЕСКИХ И АМОРТИЗИРУЮЩИХ ХАРАКТЕРИСТИКАХ СОТОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ ПРИ СЖАТИИ И ВТОРИЧНОМ НАГРУЖЕНИИ

**ГУСАРОВ А.П., МАРКОВ В.А., ОВЧИННИКОВ А.Ф., ПУСЕВ В.И.,
СЕЛИВАНОВ В.В., СООБЩИКОВ А.Н.**

*Московский государственный технический университет имени
Н.Э.Баумана 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5,
т. (499) 263-68-69, факс (499) 261-89-70, E-mail: mva_2805@mail.ru*

Сотовые конструкции из алюминиевых сплавов в качестве заполнителей силовых конструкций авиаракетной и космической техники в начале 60-х годов XX века вытеснили пеноалюминий [1] (рис. 1 [2]).

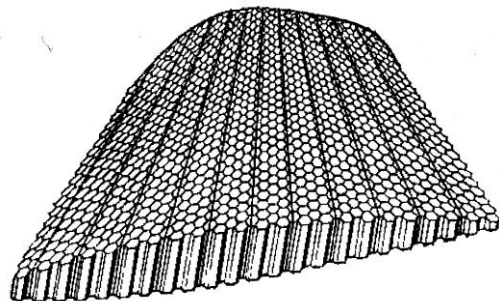


Рисунок 1 – Сотовый заполнитель, фрезерованный по копиру

Менее известно применение сотовых конструкций из алюминиевых сплавов в качестве ударного элемента подвижных деформируемых барьеров, которые являются усредненным механическим эквивалентом автомобиля при испытаниях легковых автомобилей на удар (в так называемых "краш-тестах") в соответствии с Правилами ЕЭК ООН, которые Россия на основании Женевского соглашения должна применять с 2003 г. [3, 4] (рис. 2 [3]). Еще менее известно применение сотовых конструкций в спускаемых аппаратах (отсеках экипажа) космических кораблей "Аполлон" (США) в качестве амортизаторов удара в дополнение к амортизаторам внутренней рамы с креслами астронавтов (рис. 3 [5]) для обеспечения безопасного приводнения с повышенными скоростями при незаполнении одного или двух парашютов из трех [5].

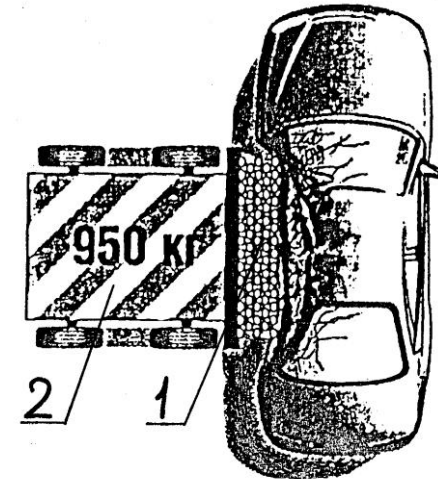


Рисунок 2 – Схема бокового удара при испытаниях легковых автомобилей на удар по Правилу 95 ЕЭК ООН: 1- ударный элемент из высокопористого алюминиевого сплава или сотовой конструкции из алюминиевого сплава; 2 - подвижной деформируемый барьер.

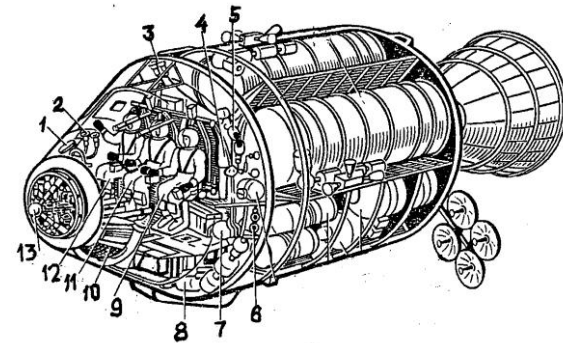


Рисунок 3 – Основной блок космического корабля "Аполлон" (США): 1 - тормозной парашют; 2, 3 - двигатели для управления по тангажу; 4 - хранилища; 5 - двигатель для управления по крену; 6 - двигатель для управления по рысканию; 7 - огнетушитель; 8 - топливный бак двигателей системы ориентации отсека экипажа; 9 - командир экипажа; 10 – основной парашют; 11 - пилот основного блока; 12 - пилот лунной кабины; 13 - стыковочный агрегат.

В соответствии с описанием [5], дополнительные амортизаторы удара из сотовых конструкций устанавливались в районе днища спускаемого аппарата (отсека экипажа) (рис. 3).

В данной работе рассматриваются механические и амортизирующие свойства сотовых конструкций из алюминиевых сплавов, которые разработаны в МГТУ им. Н.Э.Баумана, а изготовлены в условиях промышленного производства. Изготовление сотовых конструкций было связано с гофрированием листов алюминиевых сплавов толщиной h от 0.1 до 0.5 мм путем прессования, а ячейка гофрированной панели в форме половины шестиугольника имела размеры $l_1 = l_2 = l$ от 2 до 6 мм и угол $\theta = 30^\circ$ (рис. 4а).

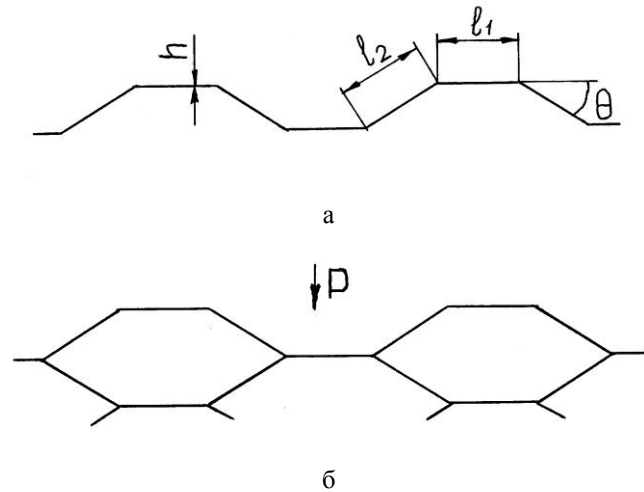


Рисунок 4 – Сотовые конструкции из листов алюминиевых сплавов: гофрированная панель (а), сотовая конструкция, получаемая склеиванием гофрированных панелей (б).

Гофрированные панели склеивались (рис. 4б) в печи при температуре 80°C и давлении до 10 МПа в сотовый блок кубической формы (рис. 5).

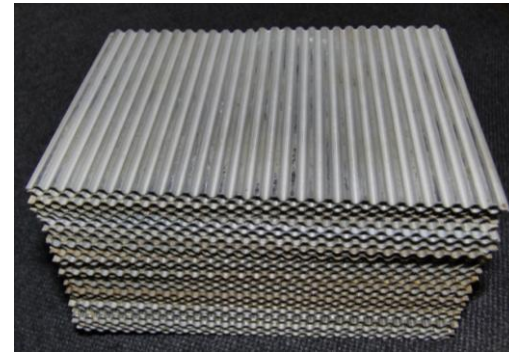


Рисунок 5 – Сотовый блок кубической формы

Для изготовления из сотовых блоков цилиндрических образцов для механических испытаний применялась механическая обработка, а сотовый блок предварительно в специальной емкости заполнялся или полиэтиленгликолем марки ПЭГ-115, который широко применяется в авиационной промышленности при изготовлении сотовых наполнителей, или расплавленным стеарином [1]. После механической обработки полиэтиленгликоль удалялся из образцов в ванне с водой при комнатной температуре, а стеарин выплавлялся. Начальная средняя плотность ρ_0 получаемых образцов с высокой точностью соответствовала расчетной величине, полученной по следующей формуле [6-8]:

$$\rho_0 = \rho \left[\frac{l_1/l_2 + 2}{2 \cos \theta (l_1/l_2 + \sin \theta)} \right] h / l_2$$

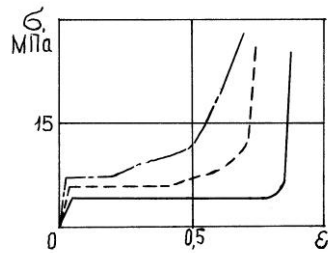
$$\text{при } l_1 = l_2 = l \text{ и } \theta = 30^\circ$$

$$\rho_0 = 2\rho h / (\sqrt{3}l),$$

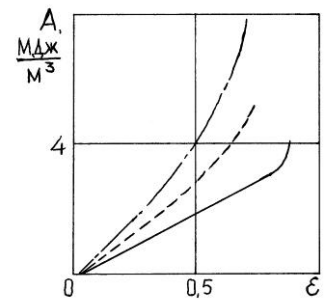
где ρ – плотность материала листа.

При изготовлении образцов учитывалось, что механические испытания на сжатие проводились в плоскости, перпендикулярной по отношению к плоскости склеивания гофрированных панелей (рис.4б). Полученные при испытаниях на сжатие диаграммы деформирования образцов сотовых конструкций (рис. 6 а: σ – напряжение, ε - деформация; сплошная линия – $\rho_0=0.402$ г/см³; начальная пористость [9] $\alpha_0=6.72$; $h=0.5$ мм; $l=4$ мм; штриховая линия – $\rho_0=0.531$ г/см³; $\alpha_0=5.08$; $h=0.5$ мм; $l=3$ мм;

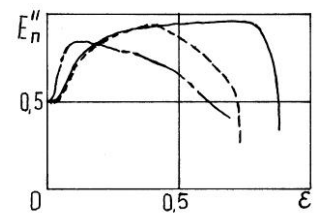
штрих-пунктирная линия – $\rho_0=0.714 \text{ г/см}^3$; $\alpha_0=3.78$; $h=0.5 \text{ мм}$; $l=2 \text{ мм}$)
 близки к идеализированной диаграмме деформирования высокопористых металлов [9].



а



б



в

Рисунок 6 – Диаграммы деформирования образцов сотовых конструкций:
 напряжение-деформация (а); удельная энергия поглощения удара A (б);
 эффективная энергия поглощения удара $E''_п$ (в).

Однако, по мере увеличения начальной средней плотности ρ_0 образцов на диаграммах деформирования появляется участок упрочнения. Полученные диаграммы деформирования позволяют проанализировать амортизирующие свойства образцов сотовых конструкций на основе известных подходов с использованием удельной энергии поглощения удара A (рис. 6б) и эффективной энергии поглощения удара E_{II}^* (рис. 6в). Если удельная энергия поглощения удара возрастает с увеличением начальной средней плотности образцов (рис. 6б), то эффективная энергия поглощения удара ближе к идеальному значению, равному 1, по мере уменьшения начальной средней плотности образцов (рис. 6в).

Разгрузка и вторичное нагружение из состояния частичного пластического уплотнения образцов сотовых конструкций из алюминиевых сплавов в отличие от образцов из ячеистого алюминия [10, 11] сопровождались появлением петли гистерезиса на диаграммах деформирования. Однако, петли гистерезиса у образцов сотовых конструкций из алюминиевых сплавов независимо от их начальной средней плотности были симметричными, а срединная линия представляла прямую. Это свидетельствовало о том, что дефект местного эффективного модуля упругости равен нулю. Кроме того, при разгрузке и вторичном нагружении образцов сотовых конструкций наблюдалась неразрывность диаграммы деформирования, что не должно влиять на расчет амортизирующих характеристик, основанных на удельной энергии поглощения удара и на эффективной энергии поглощения удара.

Следует отметить, что использование диаграмм деформирования, полученных при статическом нагружении, для оценки амортизирующих свойств высокопористых металлов и сотовых конструкций из алюминиевых сплавов, допустимо в связи с несущественным влиянием скорости деформирования при ударе в определенном диапазоне [12, 13].

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 08-08-00337-а) и АВЦП «Развитие научного потенциала высшей школы» (проект 2.1.2/4340).

ЛИТЕРАТУРА

1. Коровский Ш.Я. Летающие металлы. М.: Машиностроение, 1967. 254 с.
2. Гиммельфарб А.Л. Основы конструирования в самолетостроении. М.: Машиностроение, 1980. 370 с.
3. Чуйкин А., Сачков М. Ударным методом. Кто, как и зачем разбивает автомобили//За рулем. 2001. N 5. С. 42-46.

4. Механические свойства пористого объемно-пепфорированного алюминиевого сплава и ячеистого алюминия /А.Ф. Овчинников, В.И. Пусев, А.П. Гусаров, А.Н. Сообщиков //Научно-техническая программа Минобразования России "Научные исследования высшей школы по приоритетным направлениям науки и техники". Тезисы докладов отчетной конференции-выставки по подпрограмме "Транспорт" (Звенигород, 11-13 февраля 2002 г.). М.-Звенигород: Изд. МАИ, 2001. С. 340-341.

5. Космонавтика: энциклопедия/Гл. редактор В.П.Глушко. М.: Сов. энциклопедия, 1985. 528 с.

6. *Gibson L.J., Ashby M.F., Schajer G.S., Robertson C.I.* The mechanics of two-dimensional cellular materials//Proc. R. Soc. Lond. Pt.A382. London, 1982. P. 25-42.

7. *Gibson L.J., Ashby M.F.* The mechanics three-dimensional cellular materials//Proc. R. Soc. Lond. Pt. A382. - London, 1982. P.43-59.

8. *Gibson L.J.* Modelling the mechanical behavior of cellular materials // Mat. Sci. and Engng.: A. 1989. V. 110. N 3. P.1-36.

9. Механические и амортизирующие свойства высокопористого ячеистого алюминия / А.П. Гусаров, А.В. Жариков, В.А. Марков, А.Ф. Овчинников, В.И. Пусев, В.В. Селиванов, А.Н. Сообщиков // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Машиностроение». 2009. №1(74). С. 58-66.

10. О механических и амортизирующих свойствах высокопористого ячеистого алюминия при сжатии и вторичном нагружении / А.П. Гусаров, А.В. Жариков, В.А.Марков, А.Ф. Овчинников, В.И. Пусев, В.В.Селиванов, А.Н. Сообщиков // Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред. Материалы XIV Международного симпозиума им.профессора А.Г.Горшкова (Ярополец, 16-20 февраля 2009 г.) Т.2. М.: Изд. «Типография «ПАРАДИЗ», 2009. С. 84-93.

11. О механических и амортизирующих свойствах ячеистого алюминия при сжатии и вторичном нагружении / А.П. Гусаров, А.В. Жариков, В.А.Марков, А.Ф. Овчинников, В.И. Пусев, В.В.Селиванов, А.Н. Сообщиков // Современная баллистика и смежные вопросы механики. Материалы Всероссийской научной конференции (Томск, 17-19 ноября 2009 г.) Томск: Изд. ТГУ, 2009. С. 211-212.

12. *Youn S.W., Kang C.G.* Evaluation of mechanical properties of porous 6061 alloys fabricated by the powder compression and induction heating process//Met. and Mater. Trans. A. 2004. V. 35A. N 8. P. 2419-2426.

13. *Gassan J., Harwick W., Girlich D.* Behaviour of aluminium foams under quasi-static and crash loading//J. of Mater. Sci. Let. 2001. V. 20. N 5. P. 1047-1048.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ПРОНИКАНИЯ ТРУБЧАТЫХ УДАРНИКОВ В БЕТОН. ЧАСТЬ 1: КАВЕРНООБРАЗОВАНИЕ

ИОИЛЕВ А.Г., КРАЮХИН А.А., МОГИЛЕВ В.А., СТАДНИК А.Л.

РФЯЦ-ВНИИЭФ

607190, Нижегородская обл., г. Саров, пр. Мира, д. 37,

т. (83130) 2-78-72, E-mail a.a.krayukhin@vniief.ru

Внедрение металлических трубчатых ударников в металлические преграды при высокоскоростном ударе по нормали к её поверхности рассматривалось в работах [1,2,3,4,5].

В данной работе приведены результаты численного моделирования нормального проникания стальных трубчатых ударников в бетонную преграду начальной плотности $\rho_0=2.2$ г/см³ со скоростью $V_0=3$ км/с. Расчёты проводились с помощью эйлеровой методики ЭГАК [6]. Все ударники имели одинаковую массу $M=30.43$ г. Номера расчётов и размеры ударников приведены в таблице 1. В первой серии расчётов №1-6 длина ударников оставалась неизменной $L=5$ см, а варьировались радиус внутренней полости R_{int} и радиус внешней поверхности R . Во второй серии расчётов №7-11 радиус внешней поверхности оставался постоянным $R=0.5$ см, изменялись длина L и радиус внутренней полости R_{int} . Для описания стали в расчётах использовались уравнение состояния в форме Ми-Грюнайзена [7] с постоянным коэффициентом Грюнайзена и аппроксимацией Мурнагана для «холодного давления» и модель Джонсона-Кука [8] с $Y_0=1.5$ ГПа. Деформирование бетона в расчётах описывалось с помощью упругопластической релаксационной модели [9] со специально подобранными для бетона параметрами. Предел текучести бетона возрастал с увеличением давления [**Ошибка! Закладка не определена.**], его максимальное значение составляло $Y_{max}=0.26$ ГПа. Последнее значение соответствует прочности бетона на сжатие $f_C=0.043$ ГПа. При накоплении критического значения сдвиговой пластической деформации $\varepsilon_{cr}=0.2$ происходило мгновенное разрушение бетона. Разрушенный бетон характеризовался нулевыми значениями прочности на разрыв и сцепления (предел текучести при нулевом давлении). В расчётах использовалась равномерная квадратная сетка с размером ячейки $\Delta=0.02$ см.

В таблице 1 приведены значения глубины H_c и объёма каверны W_c на момент окончания расчётов t_{end} (момент времени полного срабатывания ударника).

Таблица 1 – Номера и результаты расчётов

№ расчёта	R , см	R_{int} , см	h/R , см	L_c , см	t_{end} , мкс	H_c , см	W_c , см ³
1	0.5	0	1	5	130	18	452
2	0.51	0.102	0.8	5	100	14.2	404
3	0.559	0.25	0.552	5	100	13.36	337
4	0.707	0.5	0.293	5	100	13.16	338
5	0.901	0.75	0.167	5	100	12.78	346
6	1.118	1	0.105	5	100	12.25	353
7	0.5	0.204	0.592	6	100	15.17	331
8	0.5	0.267	0.466	7	100	16.2	311
9	0.5	0.306	0.388	8	100	17.19	294
10	0.5	0.333	0.334	9	100	16.76	261
11	0.5	0.353	0.294	10	120	20.9	357

На рисунках 1 и 2 показаны формы каверн на момент окончания расчётов. Из рисунков видно, что во всех расчётах каверна имеет бочкообразную форму. При внедрении трубчатых ударников на оси симметрии происходит осевой выброс материала преграды, который при $R_{int}/R=0.2$ в расчёте №2 практически исчезает (происходит запираание внутренней полости), что совпадает с данными [Ошибка! Закладка не определена.]. Более подробно о структуре и параметрах осевого выброса изложено во второй части статьи [10].

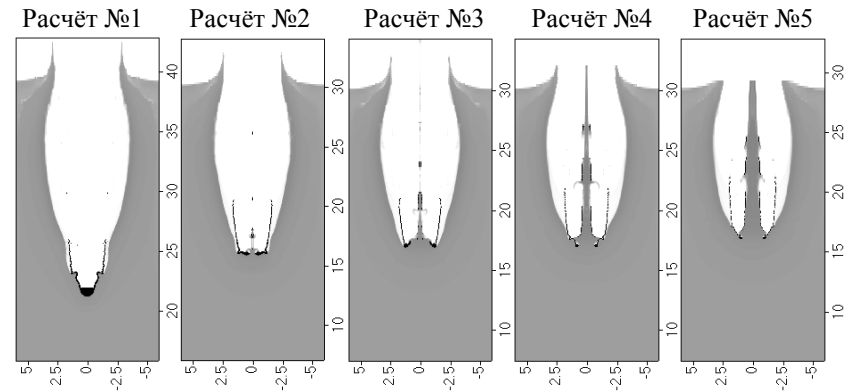


Рисунок 1 – Форма каверны на момент окончания расчётов с $L=5$ см

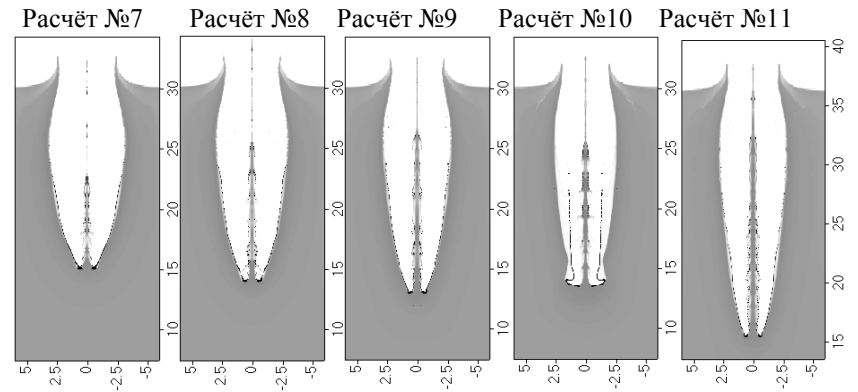


Рисунок 2 – Форма каверны на момент окончания расчётов с $R=0.5$ см

На рисунках 3 и 4 изображены зависимость безразмерных глубины и объёма каверны от отношения h/R ($h=R-R_{\text{int}}$ – толщина стенки трубки). Безразмерные величины вычислялись по формулам:

$$H^* = H_c / \left(L \cdot \sqrt{\rho_p / \rho_t} \right), \quad W^* = 2 \cdot W_c \cdot Y_t / \left(M \cdot V_0^2 \right). \quad (1)$$

Здесь $\rho_t=2.2$ г/см³ и $\rho_p=7.75$ г/см³ – плотности материалов преграды и ударника, $Y_t=0.26$ ГПа – максимальное значение предела текучести бетона. Графики показывают, что с ростом отношения h/R безразмерная глубина незначительно возрастает. Точки из расчётов №1 ($h/R=1$) и №10 ($h/R=0.334$) выбиваются из общей зависимости, это связано с характером срабатывания ударника. В первом случае (расчёт №1 со стержневым ударником) заметная часть проникания происходила в режиме движения ударника в виде жёсткого тела (пояснения про режимы срабатывания смотри далее). В другом случае (расчёт №10) материал осевого выброса взаимодействовал со стенками внутренней полости ударника, что привело, в конце концов, к выворачиванию наружу неизрасходованной части ударника (смотри рисунок 2) - в итоге глубина проникания снизилась.

В серии расчётов с $R=\text{const}=0.5$ см безразмерный объём возрастает с увеличением отношения h/R . Точка из расчёта №11 ($h/R=0.294$) выбивается из этой зависимости, это связано с увеличением времени счета до $t_{\text{end}}=120$ мкс - за счёт инерционного расширения боковых стенок объём каверны увеличился. В случае проникания ударников постоянной длины $L=\text{const}=5$ см при $h/R<0.6$ объём каверны меняется слабо. С увеличением этого отношения начинается рост объёма, который связан с эффектом запираания внутренней полости трубчатого ударника.

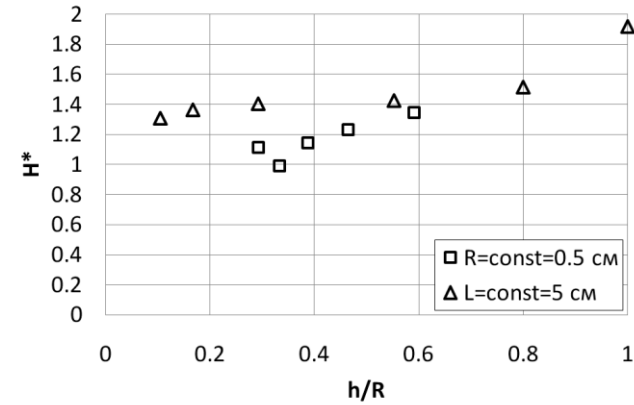


Рисунок 3 – Зависимость безразмерной глубины каверны от отношения h/R

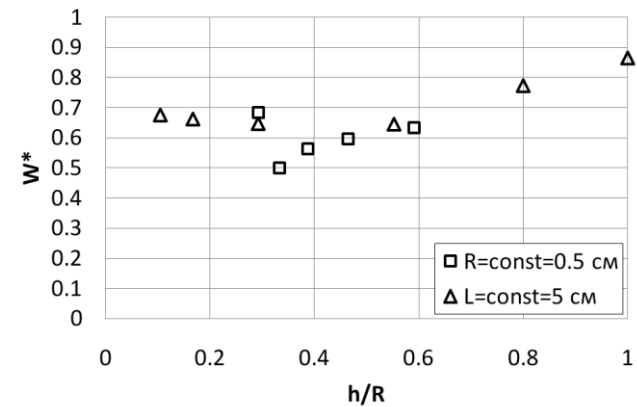


Рисунок 4 – Зависимость безразмерного объёма каверны от отношения h/R

На рисунках 5 и 6 приведены зависимости скорости срабатывания ударника dl/dt и давления P на контактной границе ударник-преграда от безразмерного времени $t^* = t \cdot V_0 / L$. На данных кривых можно выделить четыре характерных участка:

1. Нестационарная или ударноволновая фаза внедрения, время действия $0 < t^* < 0.5$. Характеризуется резким спадом давления на контактной границе и ростом скорости срабатывания. Начальные значения этих

величин можно оценить из решения задачи о распаде разрыва: $P \approx 28$ ГПа и $dl/dt \approx 0.65$ км/с.

2. Проникание в режиме гидродинамического срабатывания ударника, время действия $0.5 \leq t^* \leq 2.5$. Характеризуется линейным спадом скорости срабатывания и контактного давления. Данное снижение происходит из-за уменьшения массовой скорости недеформированной части ударника, которое обусловлено прохождением через неё упругих волн и далее их отражением от тыльной поверхности ударника в виде волн разрежения. Это приводит к уменьшению инерционной компоненты сопротивления внедрению.

3. Проникание в режиме пластического деформирования ударника, в котором появляется возрастающее влияние сдвиговой прочности материала ударника, время действия $2.5 \leq t^* \leq 5$. Характеризуется линейным спадом скорости срабатывания и контактного давления. При переходе от второго к третьему участку обе зависимости испытывают достаточно сильный излом. Средняя массовая скорость недеформированной части ударника в момент перехода от режима гидродинамического срабатывания к режиму пластического деформирования составляет $V \approx 2.5$ км/с

4. Проникание в режиме твердого тела, время действия от $t^* = 5$ до момента остановки неизрасходованной части ударника. Этот участок наблюдается только в расчёте №1 со сплошным стержнем, в расчётах с трубчатыми ударниками проникатели успевают практически полностью израсходоваться.

Отметим, что длительность участков №1-3 не зависит от типа ударника (стержень или трубка) и его поперечных размеров, а определяется только длиной проникателя и скоростью удара при прочих равных условиях. Скорости срабатывания и давление на контактной границе для всех трубчатых ударников совпадают друг с другом. По сравнению со стержневым ударником скорость срабатывания трубчатых ударников на участках №1 и 2 больше на $\Delta(dl/dt) \approx 0.1$ км/с, на участке №3 все кривые совпадают друг с другом. Кривые, полученные в расчёте №2 ($h/R = 0.8$), лежат между результатами для остальных трубчатых проникателей и стержневым ударником. Как было отмечено ранее, при таких поперечных размерах трубчатого ударника произошло практически полное запаривание его внутренней полости.

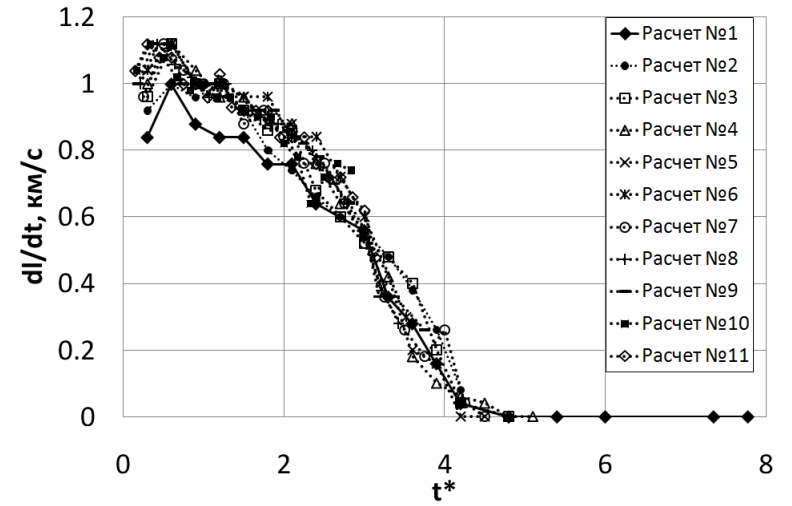


Рисунок 5 – Зависимости скорости срабатывания ударника от безразмерного времени

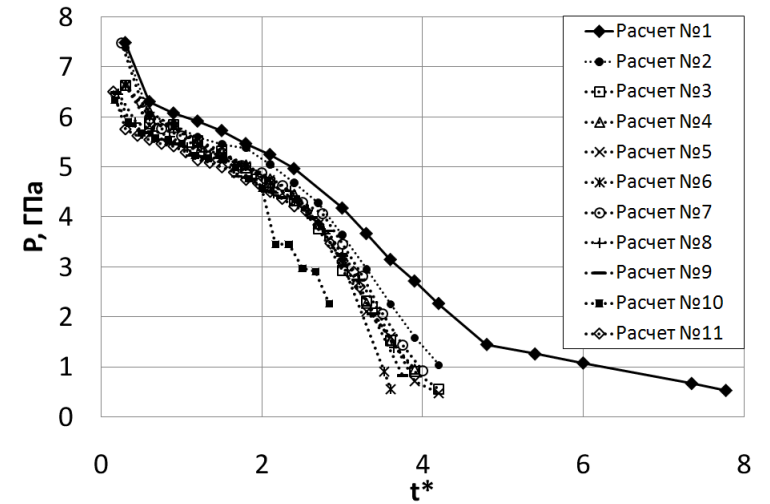


Рисунок 6 – Зависимости давления на контактной границе ударник-преграда от безразмерного времени

В экспериментальной работе [Ошибка! Закладка не определена.] показано, что с точки зрения конечной глубины каверны стержневые и трубчатые ударники дают одинаковые результаты. Это также следует из следующего соображения: тонкостенную трубку с толщиной стенки h можно представить как пучок стержней, имеющих диаметр $d=h$. Как видно из рисунка 3, значение безразмерной глубины проникания в расчёте №1 со стержневым ударником в ~ 1.5 раза превышает результаты, полученные в расчётах с трубчатыми ударниками, что на первый взгляд противоречит опытным данным. Отметим, что на момент остановки расчёта №1 остаток ударника в режиме жесткого тела еще продолжает двигаться со скоростью $V \approx 0.5$ км/с. В книге [11] на основе анализа экспериментальных данных показано, что при $L/d > 7$ процесс проникания стержневого ударника можно считать стационарным, т.е. на начальной нестационарной и конечной инерционной стадиях проникания ударника вносится малый вклад в значение полной глубины каверны; при уменьшении L/d безразмерная глубина проникания возрастает за счёт увеличения вклада других стадий по сравнению со стационарной. В расчётах с трубчатыми ударниками $L/h > 12$. В расчёте №1 со стержневым ударником $L/d = 5$, т.е. стационарный режим проникания не реализовался, поэтому безразмерная глубина каверны оказалась заметно большей, чем в остальных расчётах. Для проверки данной гипотезы был проведен расчёт №12 проникания стержня с размерами $L = 5$ см и $d = 0.309$: отношение $L/d = 16.18$ соответствовало $L/h = 16.18$ в расчёте №3 с трубчатым ударником. На рисунке 7 показаны начальные геометрии и конечные формы каверн в этих расчётах. Глубина проникания стержневого ударника в расчёте №12 составила $H_c = 13.63$ см, что только немного больше $H_c = 13.36$ см в расчёте №3.

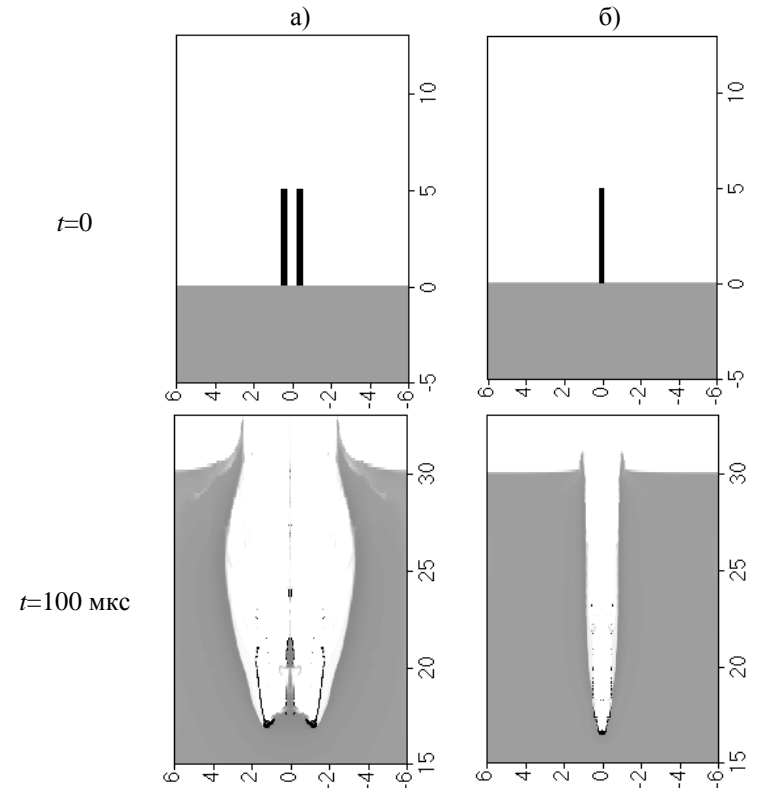


Рисунок 7 – Начальная геометрия и конечная форма каверны:
а) расчёт №3 (трубка); б) расчёт №12 (стержень)

На рисунке 8 показаны зависимости скорости срабатывания ударников от безразмерного времени. Из графика видно, что на гидродинамической стадии проникания скорость срабатывания стержневого ударника ниже, чем трубчатого. Вместе с тем длительность этой стадии у стержневого ударника больше, а спад скорости срабатывания менее интенсивный. Амплитуда упругой волны, тормозящей недеформированную часть проникателя, $\sigma \sim c$, где c – скорость продольной волны. Для случая стержня или пластины (трубку можно рассматривать как согнутую пластину) скорость продольных волн вычисляется по соответствующим формулам:

$$c_{rod} = \left(\frac{E}{\rho} \right)^{1/2}, \quad c_{plate} = \left(\frac{E}{\rho \cdot (1 - \nu^2)} \right)^{1/2}. \quad (2)$$

Поскольку $c_{plate} > c_{rod}$, то трубчатый ударник быстрее теряет скорость и раньше переходит в режим пластического деформирования. Эти

два отличия скомпенсировали друг друга, и глубина каверны получилась одинаковой для стержня и трубки.

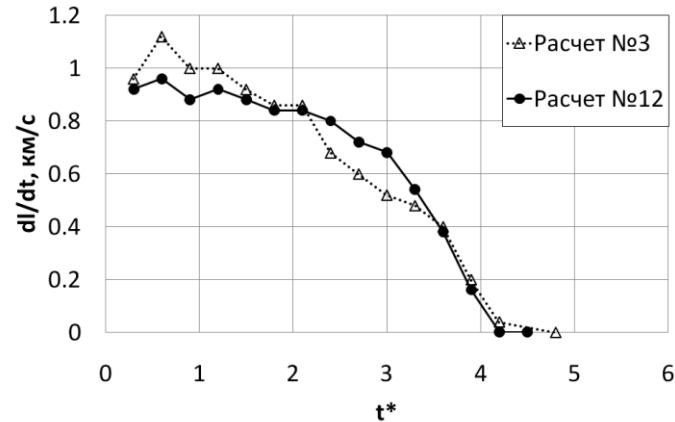


Рисунок 8 – Зависимости скорости срабатывания ударников от безразмерного времени

В заключение перечислим основные результаты работы:

1. Процесс внедрения трубчатого ударника, как и стержневого, можно разделить на четыре характерных участка: ударно-волновая стадия, стадия гидродинамического срабатывания, стадия пластического деформирования и стадия движения остатка ударника в виде жесткого тела (для трубчатых ударников остаток весьма незначителен, поэтому быстро останавливается). Зависимость скорости срабатывания трубчатых ударников $\frac{dl}{dt}$ (l – текущая длина ударника) от безразмерного времени $t^* = t \cdot \frac{V_0}{L}$ примерно

одинаковая, причём на ударно-волновой стадии проникания и на стадии гидродинамического срабатывания скорость срабатывания трубчатых ударников на 10÷15% больше, чем стержневого ударника. При проникании в режиме пластического деформирования ударника ($t^* > 2.5$) значения скорости срабатывания стержневого и трубчатых ударников отличаются незначительно.

2. Безразмерные глубина каверны H^* и объём каверны W^* слабо зависят от отношения h/R : результаты всех расчётов лежат в интервале $H^* = 1.2 \pm 0.25$ и $W^* = 0.6 \pm 0.1$. Исключение составили расчёт №1 со стержневым ударником, в котором заметная часть проникания происходила в режиме внедрения жёсткого тела, и расчёт №10 с трубчатым ударником, в котором реализовалось выворачивание стенки трубки в радиальном направлении. Каверна во всех расчётах имеет бочкообразную форму – сече-

ние максимального диаметра находится на некоторой глубине от лицевой поверхности преграды.

3. Значения глубины внедрения стержневого и трубчатого ударников равной длины L и с $d=h$ (d – диаметр стержневого ударника, h – толщина стенки трубчатого ударника) при $L/d > 10$ практически совпадают.

ЛИТЕРАТУРА

1. Козорезов К.И., Миркин Л.И. Упрочнение металлов при кумуляции ударных волн // ДАН. 1966. Т.171, №2. С.324-326.
2. Рини Т. Численное моделирование явлений при высокоскоростном ударе / Высокоскоростные ударные явления. Под ред. Р.Кинслоу. М.: Мир, 1973. С.164-219.
3. Евстропьев-Кудреватый В.В. и др. Моделирование стационарного процесса высокоскоростного взаимодействия деформируемых твердых тел // ЖТФ. 1990. Т.60, №3. С.102-106.
4. Mills J.T., Curtis J.P. A theoretical investigation of the penetration properties of hollow particles // Int. J. Impact Engng. 2001. Vol.26. P.523-531.
5. Велданов В.А. и др. Особенности высокоскоростного взаимодействия трубчатых ударников с преградами / Экстремальные состояния вещества. Детонация. Ударные волны. Тр. Межд. конф. XI Харитоновские тематические научные чтения. Саров, 16-20 марта 2009г. Под ред. А.Л.Михайлова. Саров: ВНИИЭФ, 2009. С.474-477.
6. Янилкин Ю.В. и др. Комплекс программ ЭГАК++ для моделирования на адаптивно-встраиваемой дробной счетной сетке // ВАНТ. Сер. Математическое моделирование физических процессов. 2003. Вып.1. С.20-28.
7. Зельдович Я.Б., Райзер Ю.П. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. М.: Наука, 1966.
8. Johnson G.R., Cook W.H. A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures / Proc. VII Int. Symp. Ballistics. The Hague, The Netherlands, 1983. P.541-547.
9. Замышляев Б.В., Евтерев Л.С. Модели динамического деформирования и разрушения грунтовых сред. М.: Наука, 1990.
10. Иоилев А.Г., Краюхин А.А., Стадник А.Л. Численное моделирование высокоскоростного проникания трубчатых ударников в бетон. Часть 2: осевой выброс материала преграды / Тр. Всеросс. научно-технич. конф. «Фундаментальные основы баллистического проектирования – 2010». Санкт-Петербург, 28 июня – 2 июля 2010. С.
11. Лазарев В.Б., Баланкин А.С., Изотов А.Д., Кожушко А.А. Структурная устойчивость и динамическая прочность неорганических материалов. М.: Наука, 1993.

**ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ПРОНИКАНИЯ
ТРУБЧАТЫХ УДАРНИКОВ В БЕТОН.
ЧАСТЬ 2: ОСЕВОЙ ВЫБРОС МАТЕРИАЛА ПРЕГРАДЫ**

ИОИЛЕВ А.Г., КРАЮХИН А.А., СТАДНИК А.Л.

РФЯЦ-ВНИИЭФ

607190, Нижегородская обл., г. Саров, пр. Мира, д. 37,

т. (83130) 2-78-72, E-mail a.a.krayukhin@vniief.ru

Внедрение металлических трубчатых ударников в металлические преграды при высокоскоростном ударе по нормали к её поверхности рассматривалось в работах [1,2,3,4,5]. В данной работе приведены результаты численного моделирования нормального проникания стальных трубчатых ударников в бетонную преграду начальной плотности $\rho_0=2.2$ г/см³ со скоростью $V_0=3$ км/с. Все ударники имели одинаковую массу $M=30.43$ г. В первой серии расчётов длина ударников оставалась неизменной $L=5$ см, а варьировались радиус внутренней полости R_{int} ($R_{int}=0, 0.102, 0.157, 0.193, 0.25, 0.5, 0.75, 1, 1.096$ см) и радиус внешней поверхности R . Во второй серии расчётов радиус внешней поверхности оставался постоянным $R=0.5$ см, изменялись длина ($L=6, 7, 8, 9, 10$ см) и радиус внутренней полости R_{int} . Подробно постановка расчётов, а также обсуждение промоделированного в них процесса кавернообразования в бетоне изложены в первой части статьи [6]. В данной второй части статьи подробно рассматриваются структура и параметры осевого выброса разрушенного материала преграды (бетона) через полость трубчатого ударника.

Рассмотрим типичную картину проникания трубчатого ударника на примере расчёта №5 с размерами ударника: $R_{int}=0.25$ см, $R=0.559$ см, $L=5$ см (смотри рисунок 1). Вследствие высокой скорости удара на начальном этапе процесс движения ударника в преграде аналогичен прониканию в преграду кумулятивной струи. Под действием высокого давления на контактной границе ударник-преграда проникатель за счет разгрузки со своих свободных боковых поверхностей интенсивно срабатывается, его материал растекается по стенкам образующейся каверны. Материал преграды также выдавливается из зоны высокого давления: часть его выносятся вдоль границы каверны к лицевой поверхности мишени, а другая часть за счет пластических деформаций перемещается из зоны образующейся каверны в радиальном направлении. В случае внедрения стержневого ударника в области контактной границы ударник-преграда радиальная скорость материала преграды направлена только от оси симметрии

(расширение). При проникании трубчатого ударника в области внутри полости ударника имеет место движение вещества к оси симметрии (схлопывание). Как показали настоящие расчёты, расчёты [Ошибка! Закладка не определена.] и эксперименты [Ошибка! Закладка не определена.], последнее обстоятельство вызывает высокоскоростной осевой выброс материала преграды наподобие кумулятивной струи в сторону, противоположную направлению движения ударника. После окончания проникания (полного срабатывания ударника) в области дна каверны на оси симметрии остается выступ из материала преграды.

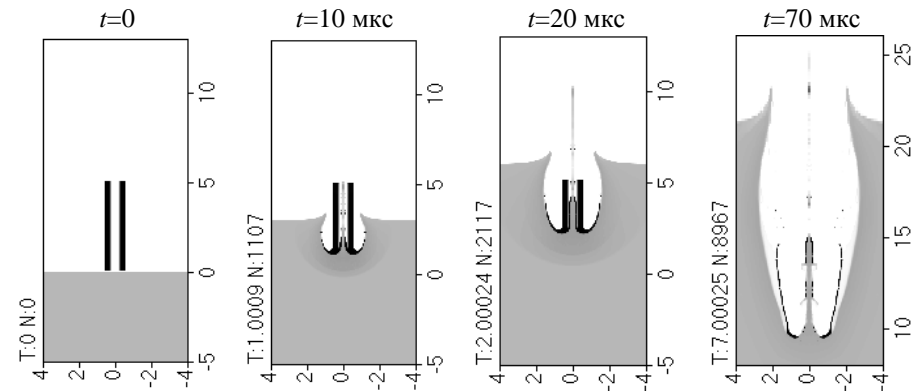


Рисунок 1 – Поля плотности на характерные моменты времени

Рассмотрим более подробно структуру осевого выброса разрушенного материала преграды (бетона). Результаты настоящего численного моделирования показали, что во всех расчётах осевой выброс с точки зрения распределения поперечного размера вдоль длины имеет ярко выраженную двухзонную структуру: виден толстый “столб” – область бетона, ближайшая к контактной границе ударник-преграда, далее следует тонкая “струя”. Динамику формирования осевого выброса можно рассмотреть на примере расчёта №5 (смотри рисунок 1). Видно, что сначала формируется “струя”, после момента времени $t \approx 10$ мкс начинается формирование “столба”. Массовая скорость материала в “струе” направлена против движения ударника, в “столбе” – сонаправлена с ударником. Высокоскоростная обратная “струя” образуется на нестационарном этапе проникания при схлопывании ударных волн на оси симметрии; вдоль её длины имеется значительный градиент массовой скорости с максимумом у вершины, поэтому с течением времени она сильно растягивается. Формирование “столба” обусловлено продавливанием бетона через внутреннюю полость в ударнике на квазистационарном этапе внедрения. На рисунке 2 приведена зависимость безразмерной скорости вершины обратной струи от h/R

($h=R-R_{\text{int}}$ – толщина стенки трубки) на момент времени $t=10$ мкс. Из рисунка видно, что результаты из разных серий расчётов ложатся на одну прямую. Это говорит о том, что скорость “струи” при прочих одинаковых условиях удара определяется только отношением h/R (или R_{int}/R , поскольку $h/R=1-R_{\text{int}}/R$).

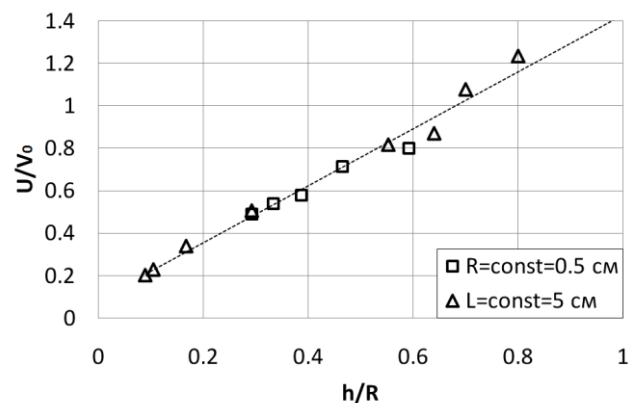


Рисунок 2 – Зависимость безразмерной скорости вершины “струи” от отношения h/R на момент времени $t=10$ мкс

Как было отмечено выше, обратная “струя” образуется на нестационарном этапе проникания из-за схлопывания вещества преграды внутри полости ударника. Исключение возможности этого схлопывания на нестационарном этапе проникания трубчатого ударника должно предотвратить возникновение обратной “струи”. Одним из возможных вариантов достижения этой цели является использование трубчатого ударника, у которого передний (ударный) торец закрыт плоским дном. Тогда на начальной нестационарной стадии внедрения течение материала преграды в области контакта будет совпадать с картиной течения, реализующейся при проникании стержневого ударника, т.е. радиальная скорость материала преграды будет направлена только от оси симметрии. После срабатывания передней части ударника вместе с дополнительным дном осевой выброс будет состоять только из толстого “столба” без тонкой “струи”. Для проверки этой гипотезы был проведен дополнительный расчёт, в котором у трубчатого ударника с теми же размерами, что и в расчёте №5, передний торец был закрыт плоским дном толщиной 0.1 см. На рисунке 3 приведены результаты этих двух расчётов. Видно, что при наличии у трубчатого ударника дна обратная “струя” не образуется, при этом “столб” остался прежним. Это подтверждает правильность сделанных выше выводов.

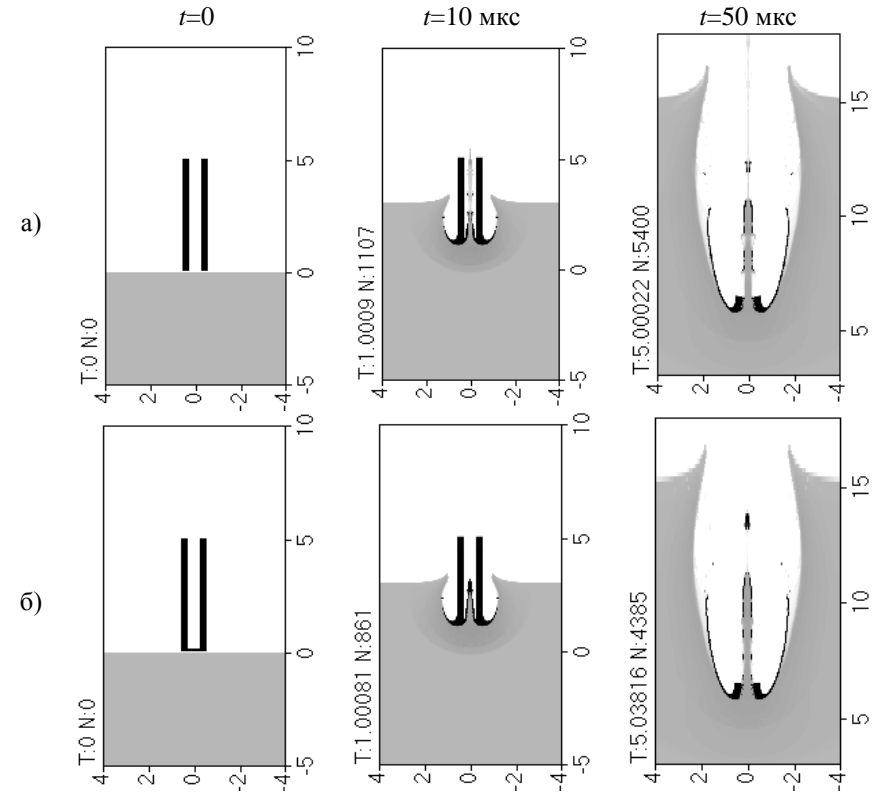


Рисунок 3 – Поле плотности на характерные моменты времени:
 а) ударник без дна; б) ударник с тонким дном

Рассмотрим, какие факторы влияют на направление и амплитуду массовой скорости в ”столбе”. На рисунке 4 приведены: а) поле плотности, б) профили массовой скорости и плотности вдоль оси симметрии в области осевого ”столба”, полученные в расчёте №5 на момент времени $t=20$ мкс. Здесь и далее при $U>0$ материал движется в направлении удара. После удара о преграду от контактной поверхности ударник-преграда вглубь преграды начинает распространяться расходящаяся тороидальная ударная волна (УВ), которая через некоторое время приобретает полусферическую форму. За ней следует волна разрушения (ВР), смотри рисунок 4а. Из рисунка 4б видно, что за фронтами УВ и ВР материал преграды приобретает массовую скорость в направлении удара, которая достигает максимального значения U_{x1} на уровне контактной границы ударник-преграда. Далее уже в области ”столба” идет резкое уменьшение скорости

до значения U_{x2} . Обсудим причину этого спада. Рассмотрим процесс проникания в системе координат, где контактная граница ударник-преграда покоится. Тогда в полость ударника втекает поток материала преграды со скоростью V_1 и радиусом y_1 , а вытекает со скоростью V_2 и радиусом y_2 . При условии несжимаемости материала преграды и отсутствии трения между боковой поверхностью “столба” и слоем отработанного материала ударника скорость вытекающего потока будет равна:

$$V_2 = V_1 \cdot \frac{y_1^2}{y_2^2}. \quad (1)$$

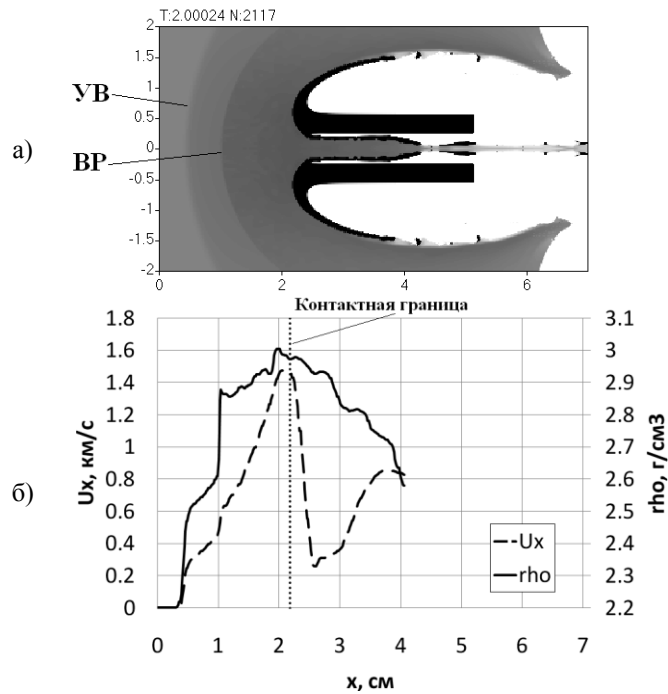


Рисунок 4 – Результаты расчёта №5 на момент времени $t=20$ мкс:
 а) поле плотности; б) профили массовой скорости (U_x) и плотности (ρ)
 вдоль оси симметрии

По результатам численного моделирования получено, что во всех расчётах $y_1 \approx R_{int}$. Радиус вытекающего потока y_2 является радиусом самого “столба”, поэтому справедливы неравенства $y_1 > y_2$ и $V_2 > V_1$. Таким образом, величина и направление массовой скорости в “столбе” определяются конкуренцией двух противоположно действующих факторов:

1) УВ, движущаяся по преграде перед ударником, за фронтом которой вещество приобретает массовую скорость, сонаправленную с движением ударника;

2) затекание материала преграды во внутреннюю полость ударника, в которой он тормозится.

Теперь рассмотрим влияние поперечных размеров ударника на эти процессы. Поскольку при фиксированном внешнем радиусе трубки $R=\text{const}$ массовая скорость U_{x1} будет определяться только площадью поперечного сечения внутренней полости трубки $S \sim R_{\text{int}}^2 \sim r^2$, то зависимость $U_{x1}=U_{x1}(r)$ можно аппроксимировать квадратичной функцией, где $r=R_{\text{int}}/R$. В предельном случае проникания стержня ($r=0$) $U_{x1}=U_{rod}$. Кроме того, при внедрении стержня массовая скорость на контактной границе будет принимать максимальное значение, то есть справедливо равенство

$\left. \frac{dU_{x1}}{dr} \right|_{r=0} = 0$. В другом предельном случае проникания трубки со стенкой конечной толщины и с бесконечно большим внутренним радиусом $R_{\text{int}} \rightarrow \infty$ ($r=1$ - пластина) $U_{x1}=0$. С учётом этих соображений искомая зависимость примет вид:

$$U_{x1} = U_{rod} \cdot (1 - r^2). \quad (2)$$

В принятой системе координат массовая скорость материала преграды на контактной границе ударник-преграда U_{rod} является не чем иным, как скоростью этой контактной поверхности. По гидродинамической теории проникания Лаврентьева:

$$U_{rod} = V_0 / \left(1 + \sqrt{\rho_t / \rho_p}\right), \quad (3)$$

где V_0 – скорость удара, ρ_t и ρ_p – плотности материалов преграды и ударника. Подставляя в формулу (3) значения $V_0=3$ км/с, $\rho_t=2.2$ г/см³ и $\rho_p=7.75$ г/см³, получим $U_{rod}=1.96$ км/с (в расчёте №1 со стержневым ударником получено $U_{rod}=1.85$ км/с). Превышение аналитической оценки над расчётной величиной связано с пренебрежением уплотнения материала преграды перед ударником. Расчёты показали, что на контактной границе ударник-преграда плотность материала преграды возрастает до $\rho \approx 3$ г/см³. Используя это значение и формулу (3), получим $U_{rod}=1.85$ км/с. На рисунке 5 приведены зависимости массовой скорости материала преграды на уровне контактной границы ударник-преграда от отношения r . Видно хорошее согласие между расчётными данными и аналитической оценкой с $U_{rod}=1.85$ км/с. В дальнейшем будем использовать эту величину.

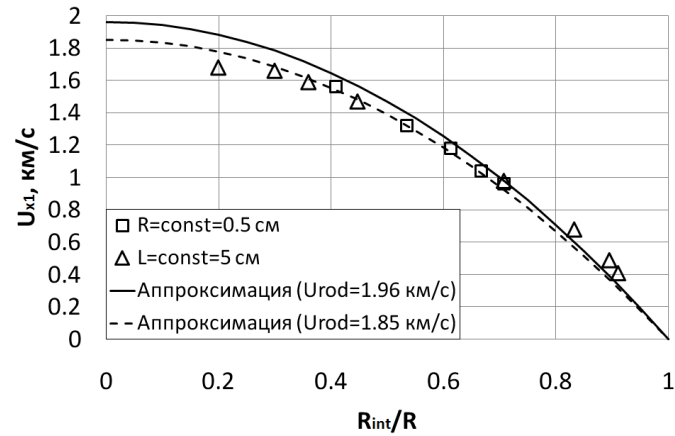


Рисунок 5 – Зависимость массовой скорости материала мишени на контактной границе ударник-преграда от отношения $r=R_{int}/R$

Рассмотрим теперь влияние поперечных размеров трубчатого ударника на величину перепада массовой скорости после затекания материала преграды во внутреннюю полость ударника. Расчёты показали, что радиус втекающего в полость потока близок к радиусу полости трубки $y_1 \approx R_{int}$. Радиус вытекающего потока, очевидно, зависит как от толщины трубки h , так и от R_{int} , поэтому в качестве определяющего безразмерного параметра будем использовать отношение h/R_{int} . Как было показано выше, перепад величины массовой скорости в “столбе” обусловлен разными радиусами втекающего потока материала преграды во внутреннюю полость ударника и радиусом уже самого “столба”. Пусть радиус осевого “столба” определяется формулой:

$$y_2 = R_{int} - a \cdot h, \quad (4)$$

где $a > 0$ – коэффициент, характеризующий степень растекания стенки трубки на контактной границе ударник-преграда и зависящий от пары взаимодействующих материалов, скорости удара и поперечных размеров трубки. На рисунке 6 приведена зависимость коэффициента $a = (R_{int} - y_2)/h$ от отношения h/R_{int} . Видно, что точки из разных серий расчётов хорошо ложатся на одну кривую, аппроксимировать которую можно с помощью степенной функции вида

$$a = A_1 \cdot (h/R_{int})^{-A_2}.$$

Для аппроксимации результатов настоящих расчётов будем использовать значения $A_1=0.465$, $A_2=0.45$.

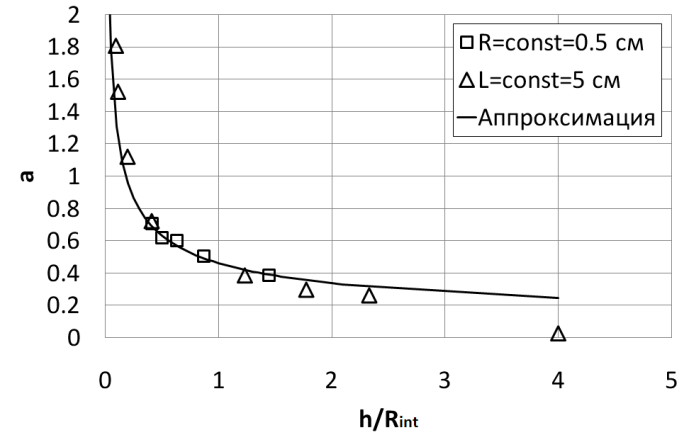


Рисунок 7 – Зависимость коэффициента a от отношения h/R_{int}

С учетом выражений (1) и (4) перепад скорости ΔU_x будет определяться формулой:

$$\Delta U_x = V_2 - V_1 = V_1 \cdot \left(\frac{R_{int}^2}{(R_{int} - a \cdot h)^2} - 1 \right). \quad (5)$$

С помощью несложных преобразований, принимая во внимание то, что $V_1 = U_{x1} - V$, где $V = U_{rod}$ – скорость контактной границы ударник-преграда, и $r = \frac{1}{1 + h/R_{int}}$, это выражение можно привести к виду:

$$\Delta U_x = U_{rod} \cdot \left(\frac{1}{1 + h/R_{int}} \right)^2 \cdot \left(\frac{1}{(1 - A_1 \cdot (h/R_{int})^{-A_2 + 1})^2} - 1 \right). \quad (6)$$

На рисунке 8 показаны зависимости величины перепада массовой скорости после затекания материала мишени в осевой “столб” от отношения h/R_{int} , полученные в расчётах, и аналитическая кривая (6). На рисунке 9 показана зависимость массовой скорости материала мишени в “столбе” U_{x2} от отношения h/R_{int} .

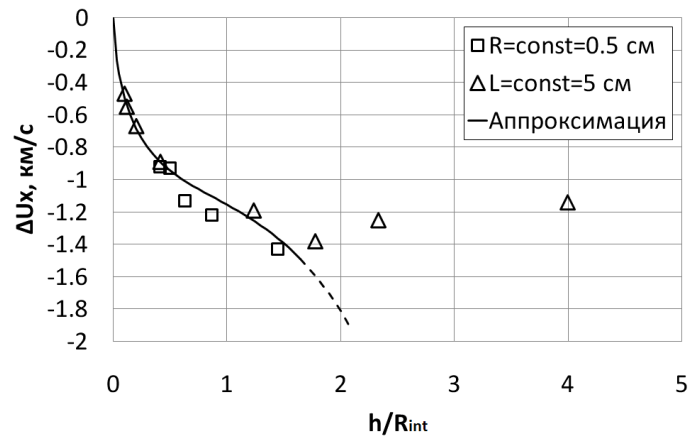


Рисунок 8 – Зависимость перепада массовой скорости после затекания материала преграды в осевой “столб” от отношения h/R_{int}

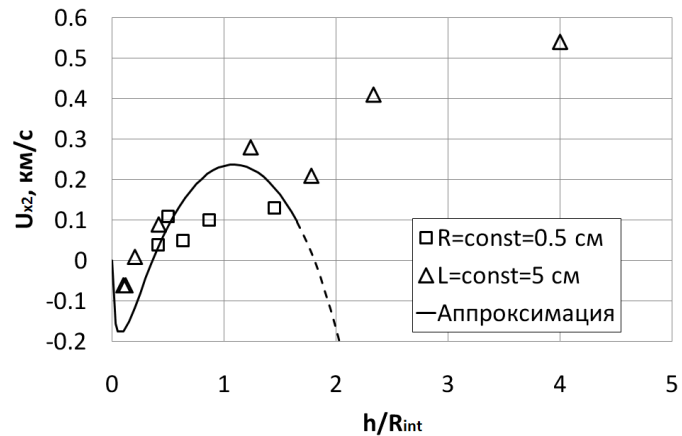


Рисунок 9 – Зависимость массовой скорости материала преграды в осевом “столбе” U_{x2} от отношения h/R_{int}

Видно, что обе аналитические кривые хорошо совпадают с результатами численного моделирования при $h/R_{int} < 1.5$, а при больших значениях h/R_{int} имеет место даже качественное отличие. На наш взгляд, оно связано с увеличением влияния трения между боковой поверхностью «столба» и слоем отработанного материала ударника. При малой толщине этого слоя отработанного материала ударника его влиянием на импульс материала «столба» можно пренебречь, при увеличении его толщины и влияние растёт, и формула (1) может стать несправедливой. Например, при $h/R_{int} = 2.33$ толщина этого слоя уже равна радиусу «столба». При внедрении тонкостенных трубок ($h/R_{int} \sim 0.1$) и трубок средней толщины ($0.2 < h/R_{int} < 1$) значение массовой скорости в осевом «столбе» возрастает с увеличением отношения h/R_{int} . При дальнейшем росте отношения h/R_{int} массовая скорость в «столбе» начинает уменьшаться. При $h/R_{int} > 1.5$ вновь происходит рост массовой скорости в направлении удара, связанный с взаимодействием стенок «столба» со слоем отработанного материала ударника. Отметим, что при проникании тонких трубок ($h/R_{int} \sim 0.1$) массовая скорость в столбе направлена против движения ударника, а при больших значениях h/R_{int} она направлена в направлении удара.

В заключение перечислим основные результаты работы:

1. При нормальном внедрении трубчатого ударника в преграду на оси симметрии образуется выброс из разрушенного материала преграды, состоящий из двух частей: тонкой «струи» и толстого «столба».
2. «Струя» из материала преграды формируется на нестационарной стадии внедрения трубчатого ударника при схлопывании ударных волн в преграде на оси симметрии наподобие кумулятивной струи. Массовая скорость в «струе» направлена против движения ударника и в области вершины «струи» линейно возрастает с увеличением отношения h/R (h – толщина стенки трубки, R – внешний радиус ударника). Показано, что при закрытии переднего торца трубчатого ударника плоским тонким дном «струи» не образуется.
3. «Столб» формируется на квазистационарной стадии внедрения ударника при продавливании материала преграды через полость в ударнике. Показано, что величина и направление массовой скорости в «столбе» определяются конкуренцией двух противоположных факторов. Первый фактор – ускорение материала преграды в сторону удара на фронте ударной волны, бегущей по преграде перед ударником; второй – затекание материала преграды во внутреннюю полость ударника, в которой он тормозится. При $h/R_{int} > 1.5$ существенную роль начинает играть взаимодействие «столба» со слоем отработанного материала ударника.

ЛИТЕРАТУРА

1. Козорезов К.И., Миркин Л.И. Упрочнение металлов при кумуляции ударных волн // ДАН. 1966. Т.171, №2. С.324-326.
2. Рини Т. Численное моделирование явлений при высокоскоростном ударе / Под ред. Р.Кинслоу. М.: Мир, 1973. С.164-219.
3. Евстропьев-Кудреватый В.В. и др. Моделирование стационарного процесса высокоскоростного взаимодействия деформируемых твердых тел // ЖТФ. 1990. Т.60, №3. С.102-106.
4. Mills J.T., Curtis J.P. A theoretical investigation of the penetration properties of hollow particles // Int. J. Impact Engng. 2001. Vol.26. P.523-531.
5. Велданов В.А. и др. Особенности высокоскоростного взаимодействия трубчатых ударников с преградами / Экстремальные состояния вещества. Детонация. Ударные волны. Тр. Межд. конф. XI Харитоновские тематические научные чтения. Саров, 16-20 марта 2009г. Под ред. А.Л.Михайлова. Саров: ВНИИЭФ, 2009. С.474-477.
6. Иоилев А.Г., Краюхин А.А., Могилев В.А., Стадник А.Л. Численное моделирование высокоскоростного проникания трубчатых ударников в бетон. Часть 1: кавернообразование / Тр. Всеросс. научно-технич. конф. «Фундаментальные основы баллистического проектирования – 2010». Санкт-Петербург, 28 июня – 2 июля 2010. С.

ОСНОВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ МЕХАНИЧЕСКИХ И АМОРТИЗИРУЮЩИХ СВОЙСТВ ВЫСОКОПОРИСТЫХ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ И СОТОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ

МАРКОВ В.А., ОВЧИННИКОВ А.Ф., ПУСЕВ В.И., СЕЛИВАНОВ В.В.

Московский государственный технический университет имени

Н.Э.Баумана, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5,

т. (499) 263-68-69, факс (499) 261-89-70, E-mail: mva_2805@mail.ru

В соответствии с данными [1], основанными на анализе работ по пористым средам, к высокопористым металлам можно отнести металлы, имеющие начальную пористость от 1.2 до 8.0, а начальная пористость определена как частное от деления величины плотности материала матрицы (твердой фазы, сплошного или компактного материала) на величину начальной средней плотности (кажущейся плотности) пористой среды. Пористые металлы с начальной пористостью от 8.0 до 20.0 относят к сверхпористым [1, 2]. В большинстве случаев механические характеристики высокопористых металлов, в том числе и на основе алюминиевых сплавов, получают при испытаниях на сжатие при упругопластических деформациях и деформациях пластического уплотнения. Диаграммы деформирования пеноалюминия Альмаг 35 (рис. 1 [3], где обозначены: σ - напряжение, ε - деформация; цифрами – диаграммы деформирования пеноалюминия соответственно 1 – с начальной средней плотностью $\rho_0=0.19$ г/см³ (начальная пористость $\alpha_0=14.21$); 2 – $\rho_0=0.24$ г/см³ ($\alpha_0=11.25$); 3 – $\rho_0=0.32$ г/см³ ($\alpha_0=8.4$)) и высокопористых алюминиевых сплавов, полученных с помощью других технологий, имеют характерные стадии (этапы), которые в ряде работ представлены идеализированными диаграммами деформирования (рис.2 [1, 4-9], где обозначены: 1- линейная упругая стадия; 2 - нелинейная упругая стадия (переходная стадия); 3 - уплотнительно-пластическая стадия; 4 - пластическая стадия). Некоторые высокопористые и сверхпористые алюминиевые сплавы имеют диаграммы деформирования, которые близки к идеальной в диапазоне начальной пористости α_0 от 2.31 до 3.06 [10, 11] (рис. 3 а-в [10, 11]), от 3.7 до 7.1 [12], от 5.88 до 9.1 [13]. Полученные диаграммы деформирования ячеистого алюминия на основе литейного сплава АК7 независимо от начальной пористости и размера пор (рис. 3, а-в) практически соответствуют идеализированной диаграмме деформирования (рис. 3 г). Большинство исследованных высокопористых алюминиевых сплавов имеют диаграммы деформирования с упрочнением [1, 3, 4, 6, 14-24], что нежелательно для эффектив-

ного ослабления (изоляции) ударных воздействий.

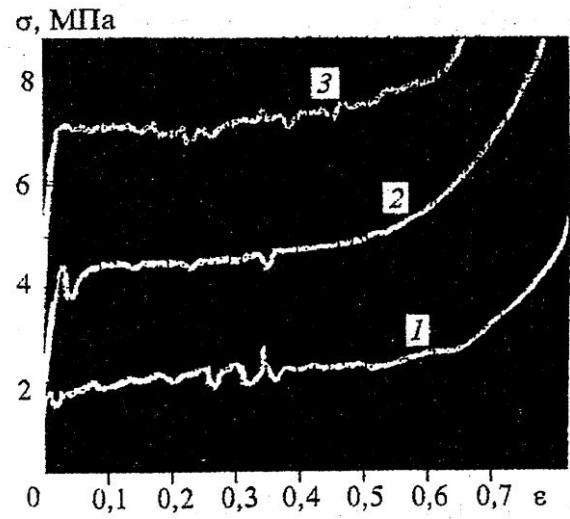


Рисунок 1 – Диаграммы деформирования пеноалюминия Альтаг 35

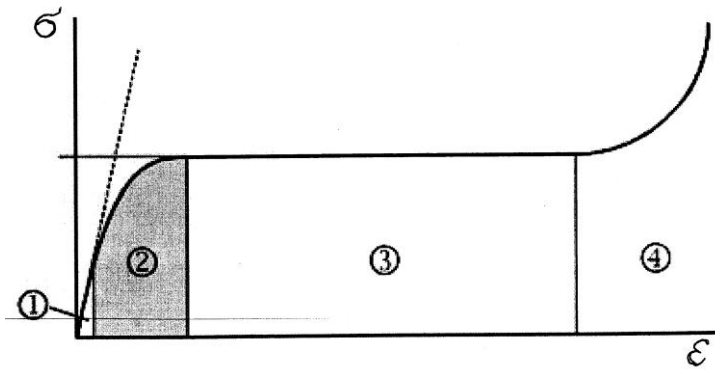


Рисунок 2 – Идеализированная диаграмма деформирования

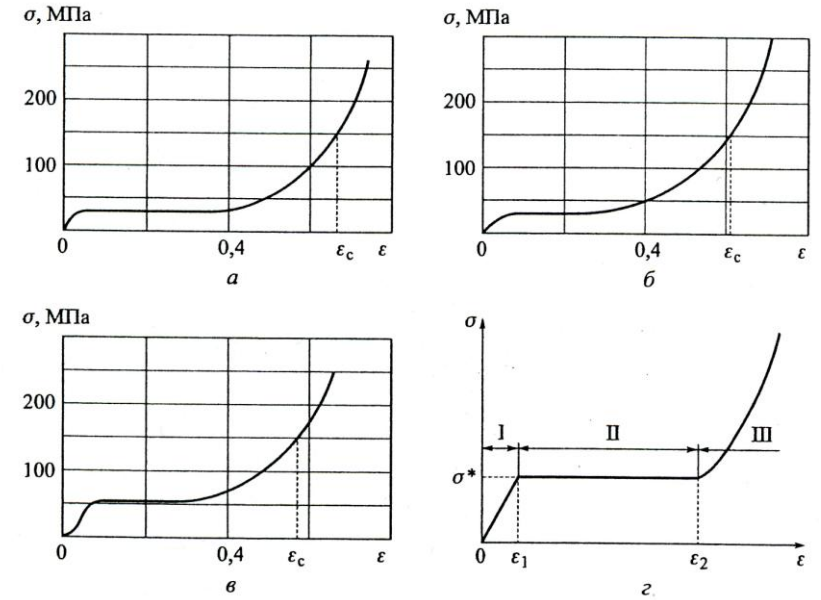


Рисунок 3 – Диаграммы деформирования образцов ячеистого алюминия (а, б, в) и идеализированная диаграмма деформирования (г): со сферическими порами диаметром 6 мм: а – $\alpha_0 = 3,06$; б – $\alpha_0 = 2,57$; со сферическими порами диаметром 4 мм: в – $\alpha_0 = 2,3$.

Следует отметить широкое применение термина «демпфирующие свойства» (характеристики) наряду с термином «амортизирующие свойства» (характеристики), что детально рассмотрено в [10, 11]. Однако, демпфирующие свойства конструкционных металлов определяются упругими постоянными и проявляются при напряжениях, которые намного меньше предела текучести металла [25], а амортизирующие свойства пористых металлов и сотовых конструкций проявляются при больших пластических деформациях и уплотнении. Кроме того, в соответствии с [26] демпфер (от немецкого *dämpfer* – глушитель) – устройство для уменьшения (демпфирования) или предотвращения вредных механических колебаний звеньев машин и механизмов, поглощающее энергию механических колебаний; а амортизатор (от французского *amortir* – ослаблять, смягчать) – устройство для смягчения ударов в конструкциях машин и сооружений в целях их защиты от сотрясений и больших нагрузок [26]. Поэтому в данной работе

применяется термин «амортизирующие свойства» (характеристики).

Очевидно, что упругая стадия деформирования I идеализированной диаграммы уплотнения ячеистого алюминия (рис. 3, г) соответствует амортизатору-аналогу с постоянной жесткостью без начальной затяжки (рис. 4, а), уплотнительно-пластическая стадия II идеальному амортизатору (рис. 4, б), а пластическая стадия III амортизатору-аналогу с "жесткой" нелинейной характеристикой (рис. 4, в [27]). Среди амортизаторов наилучшим считается такой, который способен воспринимать возможно большую энергию удара при минимальном значении силы. В этом случае оптимальной характеристикой считается такая, при которой для любого удара (при различных скоростях удара) сжатие амортизатора равно его полному ходу, а усилие сжатия $F=const$.

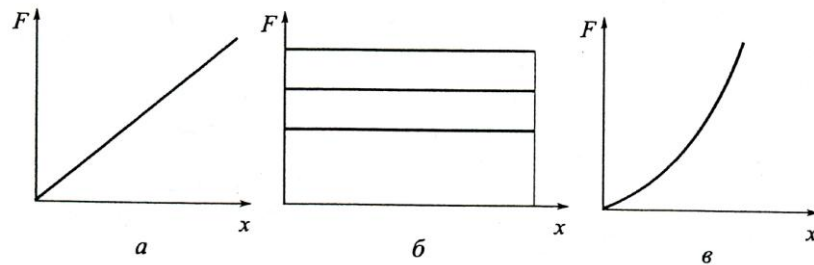


Рисунок 4 – Типичные силовые характеристики амортизатора удара [23]: а – амортизатор с постоянной жесткостью без начальной затяжки; б – идеальный амортизатор; в – амортизатор с «жесткой» нелинейной характеристикой.

Амортизирующие характеристики высокопористых металлов можно рассчитать на основе известных диаграмм деформирования в виде удельной энергии поглощения удара A и эффективной энергии поглощения удара E''_{II} , которые вычисляются следующим образом [10-12, 14, 23]:

$$A = \int_0^{\varepsilon_{\max}} \sigma d\varepsilon, \quad E''_{II} = \left(\int_0^{\varepsilon_{\max}} \sigma d\varepsilon \right) / (\sigma_{\max} \varepsilon_{\max})$$

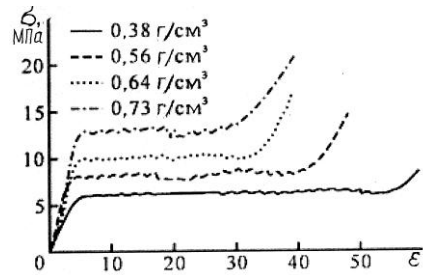
Эффективная энергия поглощения удара аналогична коэффициенту

полноты поглощения удара, который применяется при расчете амортизаторов удара [27]:

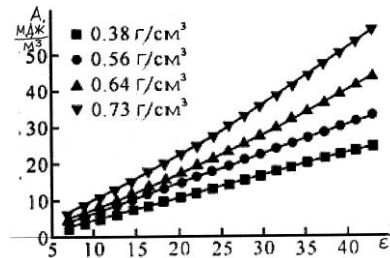
$$E'_{II} = \left(\int_0^{x_{\max}} F dx \right) / (F_{\max} x_{\max})$$

E'_{II} представляет собой отношение фактической энергии, воспринятой амортизатором, к энергии, воспринятой идеальным амортизатором при максимальной силе F_{\max} и максимальном перемещении x_{\max} . Эффективная энергия поглощения удара E''_{II} удобна для сравнительной оценки амортизирующих свойств пористых металлов и можно показать, что для линейного участка диаграммы деформирования $E''_{II}=0.5$, а для участка с постоянным напряжением $E''_{II}=1$. Идеальные амортизирующие свойства соответствуют $E''_{II}=1$. Примером наиболее полной системы расчета амортизирующих характеристик высокопористых алюминиевых сплавов могут служить приведенные на рис.5 диаграммы деформирования высокопористого алюминиевого сплава $AlSi_7Mg_{0,45} foam$ (рис. 5а [12]) и соответствующие им удельные энергии поглощения удара (рис. 5б [12]) и эффективные энергии поглощения удара (рис. 5в [12]).

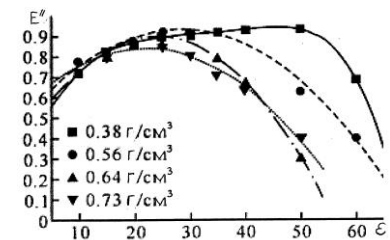
Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 08-08-00337-а) и АВЦП «Развитие научного потенциала высшей школы» (проект 2.1.2/4340).



а



б



в

Рисунок 5 – Диаграммы деформирования высокопористого алюминиевого сплава $AlSi_7Mg_{0,45} foam$ (а), соответствующие им удельные энергии поглощения удара (б) и эффективные энергии поглощения удара (в).

ЛИТЕРАТУРА

1. Экспериментальная оценка определяющих уравнений высокопористых металлов / А.П. Гусаров, А.В. Жариков, В.А. Марков, А.Ф. Овчинников, В.И. Пусев, В.В. Селиванов // Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред. Материалы XIV Международного симпозиума им. профессора А.Г. Горшкова (Ярополец, 18-22 февраля 2008 г.) Т.2. М.: Изд. МАИ, 2008. С. 72-83.

2. Ударные волны и экстремальные состояния вещества / Под ред. В.Е. Фортова, А.В. Альшулера, Р.Ф.Трушина, А.Н. Фунтикова. М.: Наука, 2000. 425 с.
3. Сионоя С. Пористый алюминий и его применение /Пер. с яп. N74/11416В. М.: ГПНТБ, 1973. 11 с.
4. Овчинников А.Ф., Пусев В.И., Гусаров А.П. Механические свойства пористых объемно-перфорированных алюминиевых сплавов//Научно-техническая конференция к 170-летию МГТУ им. Н.Э.Баумана. Тезисы докладов в 2-х ч. (Москва, 21-23 ноября 2000 г.). Ч.1. М.: Изд. МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2000. С. 157.
5. Ashby M.F., Tianjian L. Metal foams: a survey//Sci. of China. Ser. B. 2003. V. 46. N 6. P. 522-532.
6. Öchner A., Kuhn G., Gracio G. Investigation of cellular solids under biaxial stress strain//Exp. Mech. 2005. V.45. N 4. P. 325-330.
7. Dynamic compressive strength properties of aluminium foams. Part II – “shock” theory and comparison with experimental data numerical models / P.J. Tan, S.R.Raid, J.J. Harrison, Z.Zou, S. Li// J. of Mech. and Phys. of Solids. 2005. V. 53. N 10. P. 2206-2230.
8. Yu J.L., Li J.R., Hu S.S. Strain-rate effect and micro-structural optimization of cellular metals // Mech. of Mat. 2006. V.38. N1-2. P. 160-170.
9. Compressive properties of closed-cell aluminium foams as function of strain rate and temperature / C.M. Cady, G.T. Gray III, C. Liu, N.L. Lovoto, T. Nukai // Mat. Sci. and Engng.: A. 2009. V.525. N1-2.
10. Механические и амортизирующие свойства высокопористого ячеистого алюминия / А.П.Гусаров, А.В. Жариков, В.А. Марков, А.Ф. Овчинников, В.И. Пусев, В.В. Селиванов, А.Н. Сообщиков // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Машиностроение». 2009. №1(74). С. 58-66.
11. О механических и амортизирующих свойствах ячеистого алюминия при сжатии и вторичном нагружении / А.П. Гусаров, А.В. Жариков, В.А.Марков, А.Ф. Овчинников, В.И. Пусев, В.В.Селиванов, А.Н. Сообщиков // Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред. Материалы XIV Международного симпозиума им.профессора А.Г.Горшкова (Ярополец, 16-20 февраля 2009 г.) Т.2. М.: Изд. «Типография «ПАРАДИЗ», 2009. С. 84-93.
12. Wei P., Liu L. Influence of density on compressive properties and energy absorption of foamed aluminium alloy//J. of Wuhan Univ. of Techn.Mater. Sci. 2007. V. 22. N 2. P. 225-228.
13. Lu T.J., Ong G.M. Characterization of close-celled cellular aluminium alloys//J. Mat. Sci. 2001. V. 36. N 11. P. 2773-2786.
14. Thornton P.H., Magee C.L. The deformation of aluminium foams//Met. Trans. A. 1975. V.6A. N 6. P. 1253-1263.

15. *Обчинников А.Ф., Пусев В.И., Гусаров А.П.* Поведение пористых металлов при уплотнении//Механика импульсных процессов. Труды МВТУ N 399. М.: МВТУ им. Н.Э.Баумана, 1983. С. 29-35.
16. *Öchner A., Winter W., Kuhn G.* Elastic-plastic behaviour of perforation aluminium under tension and compression//Tech. Mech. 2001. V.21. N 2. P. 101-108.
17. *Gibson L.J.* Properties and applications of metallic foams. In: Comprehensive Composite Materials / Ed.-in-Chief A.Kelly and C.Zweden. V.3. Metal Matrix Composites. Amsterdam-Lausanne-New York-Oxford-Shannon-Singapore-Tokyo: Elsevier Ltd. 2000. P.821-842.
18. *Fiedler T., Öchner A., Gracio G., Kuhn G.* Structural modeling of the mechanical behaviour of periodic cellular solids: open-cell structures//Mech. of Composite Mat. 2005. V. 41. N 3. P. 277-290.
19. *Gibson L.G.* Metallic foams: structure, properties and applications//Mechanics for a New Millenium by ed. N.Aref and J.W.Philips. Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 2001. P. 57-74.
20. *Banhart J., Baumeister J.* Deformation characteristics of metal foam//J. of Mat. Sci. 1998. V.33. N8. P.1431-1440.
21. *Santosa S., Banhart J., Wierzbicki T.* Experimental and numerical analysis of bending of foam-filled sections //Acta Mech. 2001. V. 148. N 1. P. 199-213.
22. *Kennedy A.R.* Aspects of the reproducibility of mechanical properties in Al based foams//J. of Mater. Sci. 2004. V. 39. N 9. P. 3085-3088.
23. *Kolluri M., Karthikeyan S., Ramamurty U.* Effect of lateral constraint on the mechanical properties of closed-cell Al foam: Part I. Experiments//Met. and Mater. Trans. A. 2007. V. 38A. N 9. P. 2006-2013.
24. *Karthikeyan S., Kolluri M., Ramamurty U.* Effect of lateral constraint on the mechanical properties of closed-cell Al foam: Part II. Strain-hardening models//Met. and Mater. Trans. A. 2007. V. 38A. N 9. P. 2014-2023.
25. *Головин С.А., Пушкар А., Левин Д.М.* Упругие и демпфирующие свойства конструкционных металлических материалов. М.: Металлургия, 1987. 190 с.
26. *Машиностроение: терминологический словарь/Под общ. ред. М.К. Ускова, Э.Ф. Богданова. М.: Машиностроение, 1996. 592 с.*
27. *Никольский Л.Н., Кеглин Б.Г.* Амортизаторы удара подвижного состава. М.: Машиностроение, 1986. 144 с.

ВЛИЯНИЕ ДОПОЛНИТЕЛЬНОГО СЛОЯ НА ПРОЦЕСС ПРОБИТИЯ И РАЗРУШЕНИЯ СЛОИСТЫХ ПРЕГРАД

ОРЛОВ М.Ю.

Обособленное структурное подразделение "Научно-исследовательский институт прикладной математики и механики Томского государственного университета"
634057, г. Томск, пр. Ленина, 36, корп. 10
8-(3822)-529-569, факс. 8-(3822)-529-547, E-mail: orloff_m@mail.ru

Постоянное совершенствование средств кинетического воздействия на защищаемые объекты заставляет разработчиков новых ударостойких защит искать принципиально новые пути по повышению ударной стойкости. Одним из наиболее простых подходов к решению данной задачи можно считать добавление еще одного усиливающего слоя. Однако расположить дополнительный "усиливающий" слой можно с внешней и внутренней сторон защищаемого объекта. При этом скрепить основной слой защиты с дополнительным в настоящее время представляется возможным различными способами в зависимости от условий эксплуатации конструкции.

Ранее было установлено, что процесс пробития слабдеформируемым удлиненным ударником двухслойных преград сопровождался защемляющим действием верхнего слоя, в результате которого фиксировалась аномально завышенная ударная стойкость. Сохранится ли данная тенденция при действии ударников с различными формами головных частей и более высокими скоростями удара заранее ответить невозможно.

Настоящая работа посвящена развитию темы усиления слоистых конструкций путем добавления дополнительного слоя, состоящего из стальных пластин одинакового диаметра и толщины. Цель работы заключалась в выявлении влияния местоположения дополнительного слоя на процесс пробития и разрушения преград удлиненными ударниками с разными формами головных частей.

Используемая расчетно-математическая модель соответствует современным физическим представлениям о деформировании и разрушении структурно-неоднородных материалов при ударных и взрывных нагрузках. Модель является упруго-пластической, пористой, сжимаемой, учитывающей свойства прочности, ударно-волновые явления, а также совместное образование отрывных и сдвиговых разрушений. Уравнение состояния выбрано в форме Уолша, основным достоинством которого является широкая доступность.

В качестве основного инструмента исследований использовался численный лагранжев метод, расчетная часть которого дополнена механизмами расщепления расчетных узлов и разрушения расчетных элементов. Оригинальность метода заключается в том, что он содержит новый способ выделения поверхностей разрыва сплошности материалов не накладывающий серьезных ограничений на решение динамических многоконтактных задач механики деформируемого твердого тела.

Физическая постановка задачи формулируется как контактное взаимодействие удлинённых ударников с однородной, трехслойной и четырехслойными стальными преградами. Четырехслойные преграды содержали дополнительный слой, который располагался в лицевой, средней и тыльной частях. Слой состоял из двух стальных пластин одинакового материала высоты и диаметров. Введены следующие обозначения: (6) – однородная стальная преграда толщиной $h = 6\text{ мм}$, (2+2+2) – трехслойная преграда с одинаковыми толщинами слоев по 2 мм каждый, (D+2+2), (2+D+2) и (2+2+D) – четырехслойные преграды с дополнительным слоем в лицевой, средней и тыльной частях преграды.

Рассмотрены ударники одинаковой массы и диаметра с оживальной, конической и плоской головными частями. Обозначения (ОГЧ), (КГЧ) и (ПГЧ) соответственно. Начальная скорость ударников равнялась 700 м/с. Расчеты проведены при помощи разработанного в НИИ ПММ ТГУ программного комплекса «УДАР-ОС1. Ударно-волновое нагружение конструкций. Осесимметричная задача» (Свидетельство об официальной регистрации программ для ЭВМ №2010610911. – М. 2010.) для двумерного осесимметричного случая.

На рис.1 представлены рассчитанные конфигурации «ударник - мишень» при действии ударников с ОГЧ, КГЧ и ПГЧ на поздних стадиях взаимодействия. Анализируя деформационные картины и области разрушения материала преград можно заключить, что процесс пробития происходил как механизму «прокола», так и выбивания «пробки». Процесс пробития ударником с ОГЧ происходил путем прокалывания преград, а ударником с ПГЧ – путем выбивания «пробки». В процессе пробития ударником с КГЧ присутствовали оба механизма.

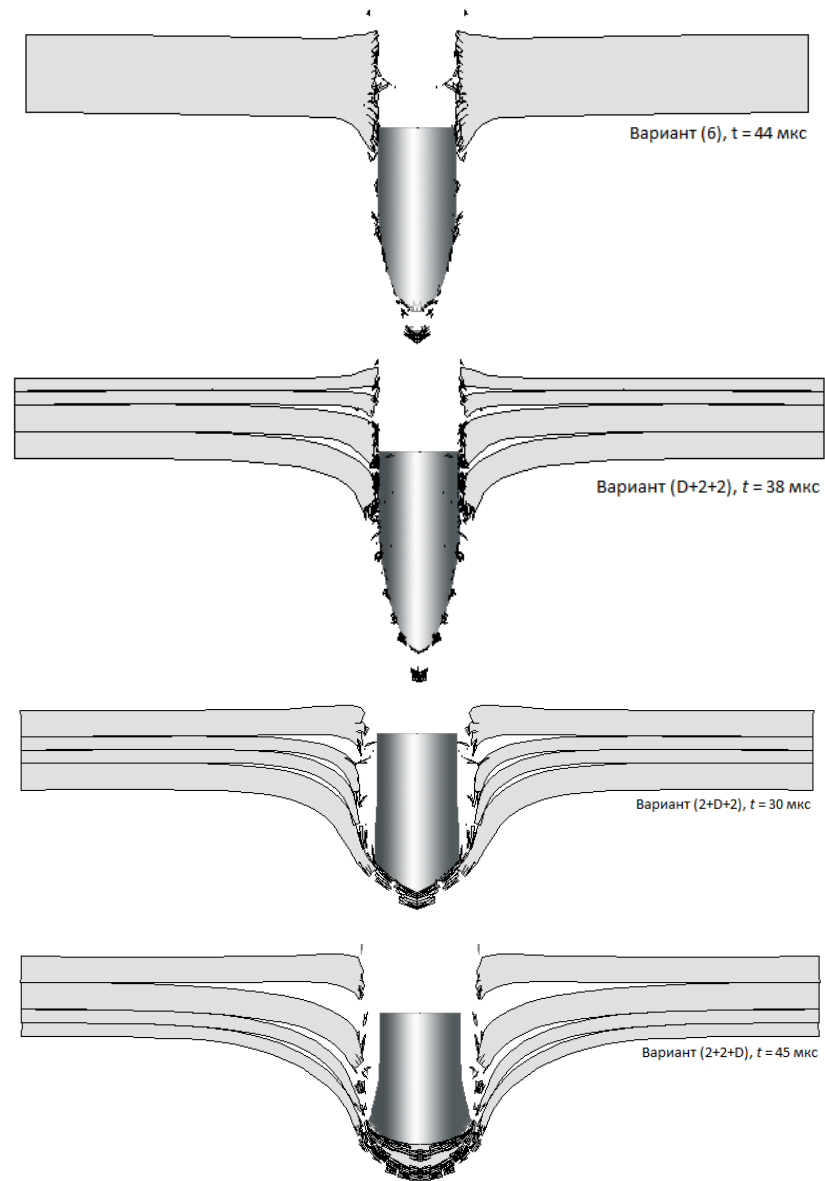


Рисунок 1 – Расчетные конфигурации «ударник – мишень»

На рис.2 приведены графические зависимости скорости ударника и силы сопротивления внедрению в преграды от времени. Из рис.2. видно, что падение скорости ударника можно подразделить на участки «быстро-го» снижения (до 20 мкс) и медленного (с 20-ой по 35-ую мкс). Три кривых, за исключением варианта (2+2+D), практически слились в одну. При действии ударника с КГЧ аналогичная ситуация возникла с вариантом (D+2+2), но в этом случае расположение кривой было ниже, чем расположение остальных кривых.

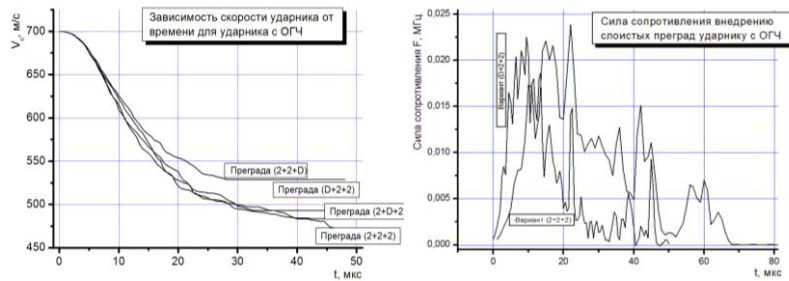


Рисунок 2 – Графики зависимости скорости ударника и силы сопротивления внедрения от времени

Сила сопротивления преград показана на рис.2. Расчетным путем установлено, что практически все кривые имели локальные максимумы и минимумы. При действии ударников с ОГЧ своего максимума сила сопротивления достигала в первые 20 микросекунд процесса, при действии ударника с КГЧ на 5-й мкс, а при действии ударника с ПГЧ – в нулевой момент времени.

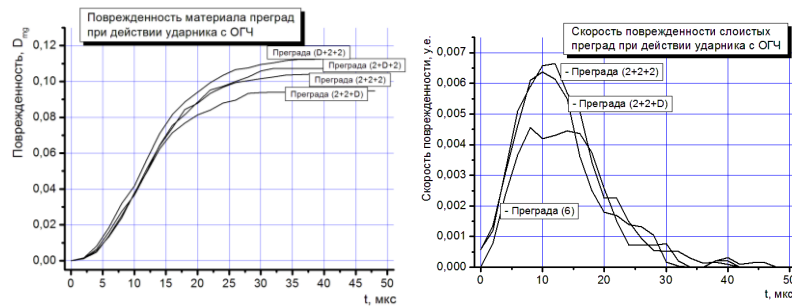


Рисунок 3 – Зависимость поврежденности и скорости поврежденности преград от времени

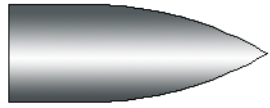


Таблица - Результаты расчетов процесса пробития слоистых преград удлинёнными ударниками при $V_0 = 700$ м/с				
Ударник с оживальной головной частью (ОГЧ): длина 16 мм, диаметр 6,1 мм, материал: сталь ШХ-15				
Наименование преграды	t_k [мкс]	V_3 [м/с]	D_{mg} [%]	d_p [мм]
Вариант (6)	44	444	10,3	6,9
Вариант (2+2+2)	47	472	10,4	7,4
Вариант (D+2+2)	37	493	11,2	7,4
Вариант (2+D+2)	42	483	10,7	7,12
Вариант(2+2+ D)	32	528	9,47	6,82
Ударник с конической головной частью (КГЧ): длина 13,1 мм, диаметр 6,1 мм, угол при вершине конуса – прямой.				
Вариант (6)	35	349	10,3	7,8
Вариант (2+2+2)	49	382	10,3	9,1
Вариант (D+2+2)	42	302	9,9	8,5
Вариант (2+D+2)	38	390	10,3	8,9
Вариант(2+2+ D)	40	392	11,1	9,2
Ударник с плоской головной частью (ПГЧ): длина 11,1 мм, диаметр 6,1 мм				
Вариант (6)	70	40	9,8	9,1
Вариант (2+2+2)	48	226	8,3	8,5
Вариант (D+2+2)	42	232	10,2	9,2
Вариант (2+D+2)	45	238	9,3	9,4
Вариант(2+2+ D)	48	237	9,5	8,9

Рис. 3 иллюстрирует зарождение и развитие поврежденности материала преград при действии ударника с ОГЧ. Расчетным путем установлено, что при действии ударника с ОГЧ и КГЧ основной объем разрушений был сформирован в преградах на начальных стадиях процесса пробития. При действии ударника с ПГЧ кривые поврежденности имели «ступеньки», которые можно связать с послойным разрушением преград. Кривые скорости поврежденности имели параболический вид и принимали максимальные значения на 10 и 12-й микросекундах.

В таблице суммированы результаты расчетов процесса пробития слоистых преград удлинёнными ударниками. В процессе счета фиксировались следующие интегральные характеристики: время процесса пробития t_k , запреградная скорость ударника V_3 , объем повреждений материала преград D_{mg} и диаметр образовавшейся в ней пробоины d_p .

Из таблицы видно, что максимальное время внедрения зафиксировано при действии ударника с ПГЧ в варианте (6), а минимальное при действии ударника с ОГЧ в варианте (D+2+2). В целом время пробития слоистых преград удлинёнными ударниками приблизительно одинаково.

Наибольшие рассчитанные значения запреградных скоростей получились при действии ударников с ОГЧ, затем ударников с КГЧ, а наименьшие - при действии ударников с ПГЧ. Это легко объяснить, если вспомнить механизмы пробития преград каждым типом ударников в отдельности. В общем, полученные тенденции соответствуют общефизическим предположениям, за исключением двух вариантов ((2+2+D) при действии ударника с ОГЧ и (D+2+2) при действии ударника с КГЧ), которые в них не вписываются. Данный факт требует экспериментальной проверки.

Максимальный объем повреждений зафиксирован в варианте (D+2+2) при действии ударника с ОГЧ, а минимальный в варианте (2+2+2) при действии ударника с ПГЧ. Минимальный диаметр пробоины был отмечен в случае «прокалывания» однородной преграды, а максимальный при выбивании из нее «пробки».

В заключении отметим, что полученные результаты позволили сделать лишь промежуточный вывод, который заключается в следующем: расположение дополнительного слоя в разных частях слоистых преград (лицевой, средней и тыльной) на процесс их пробития и разрушения практически не влияло. При решении поставленной задачи необходимо увеличить диапазон начальных скоростей, а также рассмотреть другие типы ударников. С точки зрения автора, это поспособствует увеличению научных знаний о данной проблеме, и может дать ответ на некоторые ее нерешенные аспекты.

Работа выполнялась при поддержке АБЦ программы МинОбрНауки (проект РНП 2.1.2.2509), гранта Президента РФ МК-2565.2009.8, а также грантов РФФИ 10-08-00398а, 10-08-00633а.

МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ ИЗМЕРЕНИЯ ЗАМЕДЛЕНИЯ ТЕЛ ПРИ ВЫСОКОСКОРОСТНОМ УДАРЕ

СОТСКИЙ М.Ю.

*Московский государственный технический университет
имени Н.Э.Баумана*

*105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, т. (499) 263-68-69, факс (499)
261-89-70, E-mail: msotsky.bmstu@mail.ru*

Системы для измерения параметров удара с применением пьезоакселерометров требуют проведения метрологического анализа для обоснованных оценок погрешности измеряемых величин [1-3].

В данной работе сведены и проанализированы результаты метрологических исследований, частично изложенных в опубликованных ранее работах, связанных с разработкой вопросов технологии акселерометрии терминальной баллистики (АТБ) и ее применения. Технологии АТБ (или по использованной прежде терминологии - технологии акселерометрии конечной баллистики (АКБ) [4, 5]) предназначены для получения данных о величинах и изменении во времени кинематических и силовых параметров ударника в процессе проникания в мишень. Совокупность методического, метрологического, технологического и программного обеспечения, позволяющая исследователю получать данные о замедлении ударника при характерных скоростях взаимодействия непрерывно до завершения действия ударника по мишени, составляет содержание технологии АТБ. Частные варианты технологии с учетом свойств и прочности материала мишени и требуемого скоростного диапазона разработаны для применения при экспериментально-теоретическом исследовании процессов высокоскоростного соударения [6-10]. Основой технологий АТБ являются выполненные разработки устройств и способов обеспечения непрерывной электрической связи (системы НЭС), а также разработка конструкций малогабаритных пьезоакселерометров и методического и технологического обеспечения для их применения в экспериментальных исследованиях [11- 15].

Время существования электрической связи определяется характеристиками измерительной системы и системы поддержания связи, а также начальными условиями контактного процесса. Предпочтителен случай непрерывной передачи электрического сигнала от датчика к регистратору от начала процесса и до полного его завершения. Кроме обеспечения полноты данных о процессе, такой случай повышает достоверность регистрируемой информации, предоставляя возможность ее оценки с применением основополагающих законов сохранения. Поэтому, большое значение

придается разработке систем НЭС, обеспечивающих поддержание ее непрерывности до завершения исследуемого процесса.

Методы акселерометрии в приложении к условиям реальных процессов терминальной баллистики моделей конструкций кинетического действия позволили получить данные для создания и тестирования расчетных методик, описывающих эффекты, наблюдаемые в эксперименте на непрерывных регистрациях кинематических и силовых параметров процессов терминальной баллистики [16- 18].

На рис.1 представлена схема применения и место в технологии АТБ систем НЭС, обеспечивающих непрерывную регистрацию истории замедления ударников при проникании в мишень.

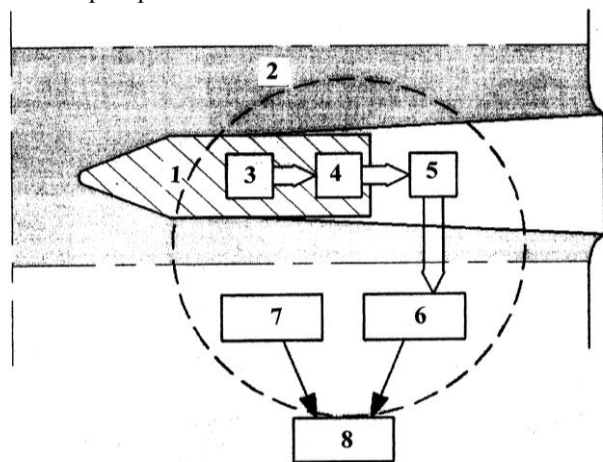


Рисунок 1 – Базовая структура технологии АТБ

Технологический комплекс для обеспечения непрерывности передачи электрического сигнала от акселерометра к регистратору на этапе терминальной баллистики содержит: 1 – модель ударника или его проникающего модуля; 2 – мишень или среда; 3 – акселерометр; 4 – узел системы НЭС, монтируемый на модели ударников; 5 – узел системы НЭС, монтируемый вне модели ударников; 6 – стационарно размещенная регистрирующая аппаратура; 7 - совокупность методического, технологического и программного обеспечения технологии АТБ; 8 – результат измерений – история замедления модели ударника в мишени.

Элементы схемы, обведенные на рис.1 окружностью составляют собой основные узлы для реализации технологии АТБ. Элементы схемы 4 и 5 вместе с расширенными стрелками составляют блок системы НЭС, рассматриваемый нами как система обеспечения непрерывности регистрации электрического сигнала от акселерометра 3 к регистрирующей ап-

паратуре 6. Конструктивное исполнение элементов 4 и 5 вид и способ передачи сигнала от элемента 2 к элементу 6 определяют конкретный частный вариант реализации технологии АТБ.

В таблице 1 для приведенных в данной работе результатов на рис. 4 и 5 даны основные сведения об условиях проведения регистраций замедления моделей ударников и параметрах взаимодействующих конструкций. Необходимые дополнительные сведения приведены в подрисуночных подписях.

Таблица 1

Система НЭС (№ рис)	Материал ударника / диаметр (мм)	масса ударника (кг)	Скорость удара (м/с)	Материал мишени	Тип пьезоакселерометра / f_0 (МГц)
ПК (4)	Углеродистая сталь /23	0,145	534	Прочный алюминий сплав	A2M / 0,115
ПУ(5)	Сталь / 10	0,064	780	Прочный алюминий сплав	АСМ-4 / 1,1

Частные виды реализации систем НЭС в используемой технологии АТБ обозначены как: контактная связь с акселерометром, закрепленным в ударнике, при прямом взаимодействии с мишенью – ПК [11], универсальная связь с акселерометром при прямом взаимодействии с мишенью – ПУ [15]. Датчики – пьезоакселерометры, собственная частота которых в закрепленном состоянии f_0 указана в таблице. Пьезоакселерометр А2М – оригинального исполнения с плоским элементом из пьезокерамики ЦТС-19 [11]; АСМ-4 – также оригинального исполнения [12, 14] с плоским элементом из пьезокерамики ЦТС-19, монтируемым по специальной технологии [11]. Следует отметить высокое значение частот пьезоакселерометров в закрепленном на ударнике состоянии (для реализованных конструкций А2М – до 120 кГц и для АСМ-4 – до 1,1 МГц) в сопоставлении с передовыми промышленными пьезоакселерометрами [3].

Для достоверного отображения регистрируемых параметров исследуемого варианта процесса конечной баллистики необходим правильный и обоснованный выбор характеристик и параметров применяемых датчиков, схем согласования и регистрирующей аппаратуры.

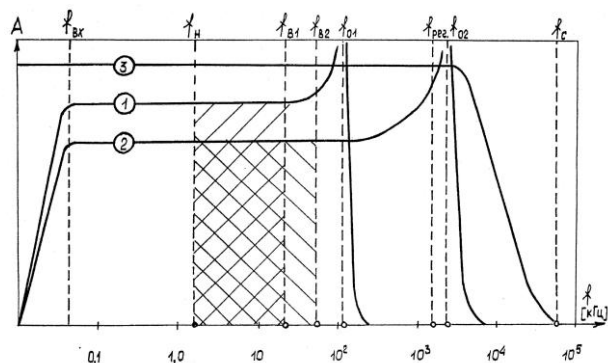


Рисунок 2 – Схематическое сопоставление частотных характеристик акселерометров, регистратора и исследуемых процессов конечной баллистики

На рис. 2 в схематизированном виде изображены одновременно амплитудно-частотные характеристики пьезоакселерометров А2М (кривая 1), АСМ-4 (кривая 2) и регистратора (кривая 3). Снабженные пьезоакселерометрами серии А2М и элементами обеспечения электрической связи ударники и примеры реализованных измерительных сборок представлены в работе [8]. Малогабаритный пьезоакселерометр серии АСМ-4 также представлен [12 - 16]. Частоты (f) отмечены по оси абсцисс, размеченной в логарифмических координатах, по оси ординат – амплитуды сигнала (A) в безразмерных единицах. Вертикальными штриховыми линиями отмечены характерные граничные и резонансные частоты акселерометров (f_{01}, f_{02}), схем согласования, регистрирующей аппаратуры ($f_{вх}, f_{рег}, f_c$) и регистрируемых процессов (диапазоны $f_H - f_{B1}$ и $f_H - f_{B2}$ выделены штриховкой). Разработаны методики выбора требуемых характеристик акселерометров, оптимальных схем поддержания непрерывности электрической связи и рациональных характеристик измерительной цепи. Для реализации измерений при испытаниях заданного варианта ударника в заданном диапазоне изменения начальных условий с применением требуемой регистрирующей аппаратуры рекомендовано, чтобы взаимное расположение границ диапазонов и резонансных частот соответствовало изображенным на рис.2 вариантам. Частные соотношения между величинами отдельных частот определяют величины амплитудной и фазовой динамической погрешности измерений датчиков в среде-мишени.

Поскольку проводимые исследования базируются на применении пьезоакселерометров, то следует также разделить общие погрешности пьезометрических схем измерений и специфические погрешности, обусловленные особенностями технологий акселерометрии конечной баллистики (АТБ). Большинство частных погрешностей, существенных при

регистрации замедлений пьезоакселерометрами, известно и исследовано [1-3]. Необходимо оценить вклад специфических частных погрешностей, основными из которых являются: регулярная динамическая погрешность применяемых пьезоакселерометров, определяемая инерционностью и частотными свойствами; погрешность от применения конкретной системы обеспечения непрерывности электрической регистрации при высоких скоростях соударения (проводная система, контактная или универсальная); погрешность определения коэффициента преобразования пьезоакселерометра из осциллограммы в случаях обеспечения регистрации замедления до окончания процесса проникания. Остальные частные погрешности технологий акселерометрии хорошо изучены и являются общими для всех схем. Так, погрешности схем согласования при наибольших временах исследуемых процессов 200 – 300 мкс и постоянной времени входной цепи порядка 30 мс составляют величину менее 1%. Погрешности усилительно-преобразовательного тракта не более 10%. Погрешность фотографического метода регистрации с экрана осциллографа менее 3%. Случайные погрешности заведомо менее 10%.

При использовании сложной измерительной аппаратуры необходимо учитывать влияние на конечный результат большого числа физических величин. В таких процессах систематические погрешности превышают случайные, поэтому методика нахождения погрешностей измерения включает два этапа [2, 10]:

1. вычисление средних значений и средне-квадратических отклонений систематической погрешности (частных погрешностей σ_i) по специальным формулам или экспериментальным оценкам с учетом коэффициентов влияния;
2. нахождение характеристик общей погрешности σ_{Σ} путем суммирования по правилам математической статистики частных погрешностей
 - а) оценка регулярной динамической погрешности применяемых пьезоакселерометров (σ_d).

Эта погрешность является систематической инструментальной погрешностью, определяемой инерционностью измерительного преобразователя (датчика) и его частотными свойствами. Расчетные методы определения частотных погрешностей акселерометров (при представлении их схемой колебательной системы с одной степенью свободы) основаны на анализе реакции этой колебательной системы на гармоническое внешнее воздействие, которая описывается однородным линейным дифференциальным уравнением второго порядка. Из решения этого уравнения вытекает, что для того, чтобы колебательная система отслеживала входное воздействие в режиме фильтра низких частот (акселерометра) и перемещение инерционной массы было пропорционально ускорению корпуса акселерометра в масштабе $1/\omega_0$, где $\omega_0 = 2\pi f_0$ - угловая частота собственных

колебаний системы, необходимо, чтобы β и ξ имели малые значения. При этом:

$\beta = \omega / \omega_0$ - отношение возбуждающей частоты к собственной частоте системы;

$\xi = c / c_{\text{ед}}$ - относительный коэффициент демпфирования ($c_{\text{ед}}$ - коэффициент критического затухания).

Тогда максимальная величина смещения инерционной массы измерительного преобразователя X в зависимости от амплитуды колебаний корпуса Y_0 равна [2]

$$X_{\text{max}} = \lambda \cdot Y_0 = \frac{\beta^2}{\sqrt{(1 - \beta^2)^2 + (2\xi\beta)^2}} \cdot Y_0$$

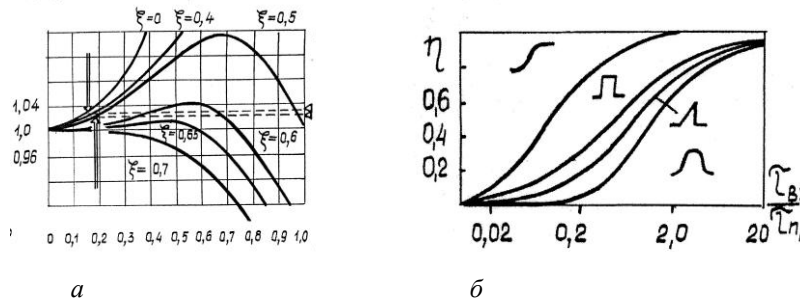


Рисунок 3 – К анализу частных характеристик измерительной цепи

Следовательно, для получения неискаженного отклика необходимо добиваться такого соотношения β при известной частоте возбуждающего процесса (в нашем случае определяемой временем проникания ударника в мишень), чтобы $\lambda \approx 1$. Для этого требуется обеспечить значительное превышение собственной частоты измерительного преобразователя над частотой регистрируемого им процесса (рис.3а). При необходимости получения равномерной характеристики $\lambda \approx 1$ в большом диапазоне соотношения частот (β), следует обеспечивать оптимальное демпфирование измерительного преобразователя. Чтобы воспользоваться для оценки динамической погрешности регистрации замедления измерительного преобразователя характеристиками акселерометра, построенными с использованием решения (1) для различных значений коэффициента демпфирования, необходимо прежде всего знать собственную частоту измерительного преобразователя и определяющую частоту негармонического (в большинстве случаев удара) возбуждающего воздействия.

Для оценки собственной частоты измерительного преобразователя требуется составить эквивалентную схему колебательной системы «ударник – измерительный преобразователь». Эта система имеет две характерные собственные частоты: более низкая – собственная частота корпуса ударника, представляемого в виде стержня, заделанного одним концом в мишень, и для ударников с меняющейся при проникании длиной эта частота изменяется во времени; более высокая – собственная частота измерительного преобразователя в закрепленном на ударнике состоянии, определяемая в общем случае, как [2]

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k_{\dot{e}\dot{i}}}{m_{\dot{e}}}}$$

где $k_{\dot{e}\dot{i}}$ и $m_{\dot{e}}$ – жесткость [н /м] и масса [кг] системы (чувствительный элемент + элементы его крепления к корпусу).

Эти частоты прослеживаются на регистрациях истории замедления как недеформируемых ударников [17], так и «жесткой» части ударников, подвергающихся эрозии и уменьшающихся по длине в процессе проникания в мишень [4,14,16]. Собственная частота измерительного преобразователя проявляется на крутых фронтах изменения величины замедления ударника в виде гармонических колебаний с малым периодом [17], позволяющих определить значение частоты. Для применяемой в качестве чувствительного элемента в пьезоакселерометрах серии АСМ-4 пьезокерамики ЦТС-19 и ее толщине 0,36 – 0,4 мм собственная частота измерительного преобразователя f_{02} составляет величину 1,1 – 1,6 МГц.

Собственная частота чувствительного элемента (расчетное значение) равна 3,5 МГц, а частота, вычисленная по формуле (2) $f_0 = 1,5$ МГц. Следовательно, регистрируемая частота – собственная частота колебаний измерительного преобразователя в закрепленном на ударнике состоянии.

Вычислив соотношение частот $\beta = \omega / \omega_0 = f_{B2} / f_{02} = 0,05$ и войдя в график (рис. 3а) видим, что даже для недемпфированной системы ($\zeta = 0$) при таком значении β частная динамическая погрешность регистрации, определяемая частотными свойствами измерительного преобразователя, не превышает 3%.

Здесь же следует отметить, что соотношение постоянной времени входной цепи $\tau_{\dot{a}\dot{b}}$ и наибольшего ожидаемого времени процесса действия ударника по мишени $\tau_{i\delta}$ определяет амплитудную погрешность воспроизведения ударного импульса. Для различных форм импульсов зависимость этой погрешности от соотношения приведена на рис. 3 б. Для рассматриваемых условий испытаний (Таблица 1). Это означает, что при лю-

бой форме регистрируемого импульса эта частная погрешность заведомо пренебрежимо мала.

Специально организованные копрывые испытания [6] и оценки коэффициента преобразования в диапазоне рабочих нагрузок на чувствительный элемент пьезоакселерометров [5, 9] выявили нелинейность коэффициента до 8%.

б) оценка частных погрешностей регистрации при моделировании методом обращения удара (σ_{ii})

Проведенные теоретические и экспериментальные оценки [9, 13] показали, что ошибку, вызываемую снижением уровня действующих ускорений за счет уменьшения скорости движения метаемой мишени ограниченной массы при обращенном метании можно исключить, увеличив начальную скорость взаимодействия в модельном опыте по сравнению с натурным. При потере скорости (в зависимости от соотношения масс мишени и ударника) $\Delta V / V_0 = 2,43 - 0,99 \%$ начальную скорость метания

мишени V_{ii} нужно соответственно увеличить по отношению к начальной скорости ударника $V_{i\delta}$ в моделируемом случае прямого удара $V_{ii} = (1,025 - 1,01) V_{i\delta}$. Оценим, какую погрешность вносит торможение мишени на

регистрируемую в опыте величину – ускорение ударника, разгоняемого ударяющей по нему моделью мишени. Очевидно, что если масса мишени ограничена возможностями разгонного устройства, а соотношение масс γ от ударника к мишени не стремится к нулю, то, при сравнении по абсолютной величине, регистрируемое значение ускорения ударника

$\frac{dV}{dt}(t)_{ii}$ меньше, чем величина замедления $-\frac{dV}{dt}(t)_{i\delta}$ ударника в процессе прямого взаимодействия ударника с мишенью бесконечной или значительной массы

$\frac{dV}{dt}(t)_{ii} < \frac{dV}{dt}(t)$. Тогда погрешность определения

величины замедления возрастет соответственно потере скорости мишенью и превысит относительную величину потери скорости, поскольку из связи кинематических величин ускорение является производной скорости. Из сделанных оценок [10, 14] следует, что погрешность в определении времени процесса прямого взаимодействия по регистрации, полученной в процессе его моделирования методом обращения удара, равна относительной потере скорости макетом мишени и составляет величину 2,43 – 0,99 %. Оценки, проведенные для возможных соотношений масс макетов

ударника ($M_{\dot{\alpha}\dot{\alpha}}$) и мишени (M_i) при $\gamma_{ii} = \frac{M_{\dot{\alpha}\dot{\alpha}}}{M_i} = 0,025 - 0,01$ дают от-

носительную погрешность определения величины замедления в процессе прямого взаимодействия соответственно 4,8 – 2%.

Если принять для всех частных составляющих нормальный закон распределения плотности вероятностей [1], предположить отсутствие линейных корреляционных связей между случайными составляющими погрешности и одинаковую достоверность их определения, то суммарную систематическую погрешность регистрации для частного варианта технологии АТБ можно определить из формулы суммирования частных погрешностей

$$\sigma_{\Sigma} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \sigma_i^2}$$

Результат измерения замедления по осциллограмме в заданный момент времени t_i может быть представлен с указанием доверительного интервала $r\sigma_{\Sigma}$ результата измерений [1], найденного для заданной доверительной вероятности α

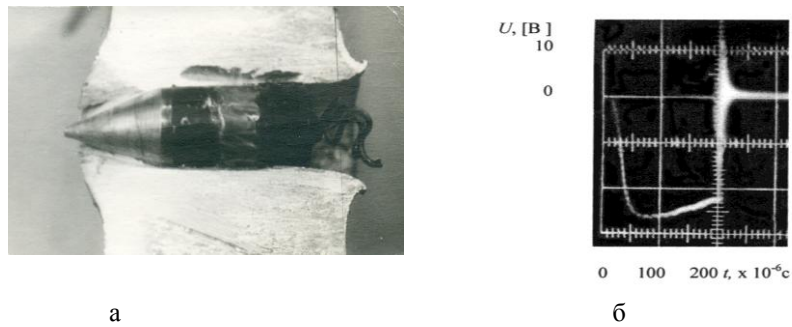
$$-\frac{dV}{dt} = -\frac{dV}{dt}(t_i) \pm -\frac{dV}{dt}(t_i) \cdot r\sigma_{\Sigma}$$

Проведенный анализ и сделанные оценки показали, что суммарная систематическая погрешность апробированных в опытах частных вариантов технологии АТБ составляет величину от 5% до 18%.

На рис.4 показан вариант отображения результата измерений замедления в виде зоны, ограниченной верхней и нижней границами доверительного интервала $r\sigma_{\Sigma}$ при заданной доверительной вероятности α .

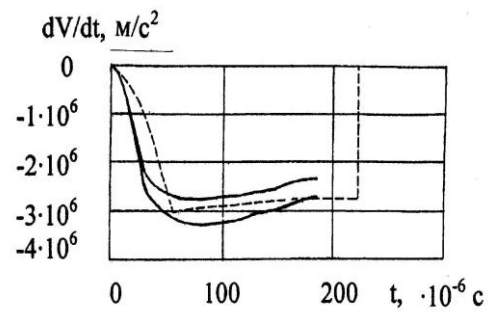
Сплошными линиями на рис.4 проведены границы относительно регистрации истории замедления ударника, находящейся посередине доверительного интервала. Пунктирной линией нанесены результаты расчета по инженерной методике [9].

Произведя регистрацию истории замедления ударника мы, с учетом принятой вероятности результата, можем утверждать, что истинное значение величины замедления в интересующий нас момент времени действия ударника по мишени не выходит за границы найденного доверительного интервала.



а

б



в

Рисунок 4 – а) результат действия ударника по мишени; б) регистрируемая осциллограмма; в) вариант отображения экспериментальных данных [9, 16] с использованием границ доверительного интервала результата измерений

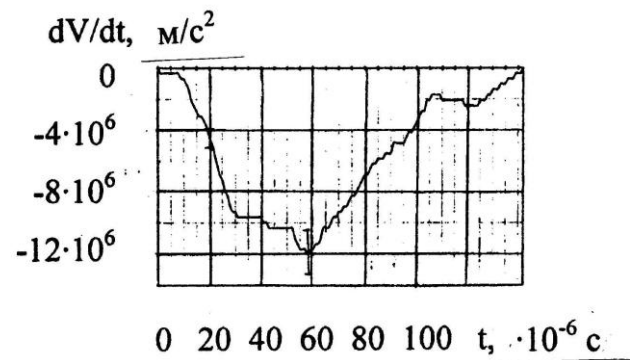


Рисунок 5 – Вариант отображения экспериментальных данных [16] с наложением доверительного интервала результата измерений на осциллограмму истории замедления ударника в мишени

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 08-08-00341а) и АВЦП «Развитие научного потенциала высшей школы» (проект 2.1.2./2792).

ЛИТЕРАТУРА

1. Приборы и системы для измерения вибрации, шума и удар: Справочник. В 2-х кН. Кн.2/Под ред.В.В.Клюева-М.:Машиностроение.-1978.- 439 с.
2. Шкаликов В.С., Пеллинец В.С., Исаакович Е.Г. и др. Измерение параметров вибрации и удара – М.: Стандарты.- 1980. -340 с.
3. Баженов А.А., Лобастов С.А., Яровиков В.И. Пьезоэлектрические датчики для измерения параметров взрывных и ударных нагружений. Ч.2 // Метрология.- 2003.- № 11. – С.19-32.
4. Сотский М.Ю. Анализ технологий непрерывной регистрации в диапазоне сверхзвуковых скоростей параметров проникания тел в деформируемые среды // IX Всероссийский съезд по теоретической и прикладной механике: Аннотации докладов Т.III (Нижний Новгород,22-28 августа 2006). Нижний Новгород: Изд-во Нижегородского госуниверситета им.Н.И.Лобачевского,2006.-С.198.
5. Велданов В.А., Ручко А.М., Сотский М.Ю. Ретроспектива становления и развития акселерометрии конечной баллистики в МГТУ им. Н.Э.Баумана // Сборник Трудов Международной конференции «Проблемы баллистики – 2006», Санкт-Петербург, 19-23 июня 2006г. Т.II, СПб.: БГТУ, 2007, с.199-208.
6. Велданов В.А., Ручко А.М., Сотский М.Ю. Экспериментальное исследование параметров процесса контактного взаимодействия и динамических прочностных характеристик материалов по регистрациям замедления ударников // Материалы XIII Международного симпозиума «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред» им. А.Г.Горшкова. Избранные доклады Ярополец, 12-16 февраля 2007 г.- Москва.-2007.-С.77-86.
7. Велданов В.А., Жариков А.В., Марков В.А., Пусев В.И., Ручко А.М., Сотский М.Ю., Федоров С.В. Экспериментальные исследования проникания недеформируемых ударников в пластилин на основе акселерометрии //Материалы XIV Международного симпозиума «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред» им. А.Г.Горшкова. Т. 2.-Ярополец, 18-22 февраля 2008 г.- М.:Изд-во МАИ, 2008.-С.45-59.
8. Велданов В.А., Жариков А.В., Марков В.А., Пусев В.И., Ручко А.М., Сотский М.Ю., Федоров С.В. Исследование динамических механических свойств песчаного грунта методом акселерометрии. // Вестник МГТУ им. Н.Э.Баумана. Сер.«Машиностроение». Специальный выпуск «Актуальные проблемы развития ракетно-космической техники и систем вооружения».- 2008.- С.79-87.
9. Велданов В.А., Марков В.А., Пусев В.И., Ручко А.М., Сотский М.Ю., Сотский Ю.М., Федоров С.В. Исследование динамических механических свойств алюминиевых сплавов методом акселерометрии. // Вестник МГТУ

- им. Н.Э.Баумана. Сер. «Машиностроение».-2010. - С.37-46.
10. Сотский М.Ю. Оценка погрешностей регистрации замедления ударника в различных средах по технологии акселерометрии при высокоскоростном ударе // Материалы XVI Международного симпозиума “Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред” им.А.Г.Горшкова. Ярополец, 15-19 февраля 2010 г. Т.2. - Ч.: ГУП «ИПК «Чувашия», 2010. - С.225-229.
11. Патент 2297619 РФ. Устройство контактной связи, установка и способ проведения испытаний с непрерывной регистрацией параметров конечной баллистики метаемых тел / Васильев А.Ю., Жариков А.В., Ручко А.М., Сотский М.Ю., Сотский Ю.М. Оpubл. в 2007, бюл. №11.
12. Патент 1741082 РФ Способ измерения ускорения и пьезоэлектрический акселерометр для его осуществления/ М.Ю.Сотский.- Оpubл.в 1992,Бюл.№22.
13. Патент 1799744 РФ Способ монтажа устройства и установка для его осуществления /М.Ю.Сотский. - Оpubл. в1993,Бюл.№9.
14. Сотский М.Ю. Экспериментальная и теоретическая оценки соотношений параметров в процессах проникания в мишень геометрически подобных стержней // Актуальные проблемы фундаментальных наук Сб. докл. Междунар.науч.-техн конф. Т.3. - М.: МГТУ, 1991.-С. 185-187.
15. Патент 2263297 Российской Федерации, Устройство и способ определения параметров проникания метаемого тела в преграде/Васильев А.Ю.,Ручко А.М., Сотский М.Ю. Оpubл. в 2005, Бюл. № 30.
16. Deceleration – Time Measured Striker Penetration Tendency in Qualitatively Different Terminal Ballistics Processes / M. Ju. Sotsky, V. A. Veldanov, A. M. Ruchko, A. Ju. Vasilev, Ju. M. Sotsky // *Proceedings 25 th International Symposium on Ballistics*, Beijing, China, May 17-21, 2010,Vol. 2. - Beijing: China Science and Technology Press, pp.1070 - 1077.
17. Велданов В.А., Марков В.А., Пусев В.И., Ручко А.М., Сотский М.Ю., Сотский Ю.М. Получение данных о динамических свойствах стали из анализа истории замедления ударника в мишени // Материалы XVI Международного симпозиума “Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред” им.А.Г.Горшкова. Ярополец, 15-19 февраля 2010 г. Т.2. - Ч.: ГУП «ИПК «Чувашия», 2010. - С.121-127.
18. Велданов В.А., Марков В.А., Пусев В.И., Ручко А.М., Сотский М.Ю., Федоров С.В. Результаты тестирования инженерного и численного расчетов ударного процесса по регистрации замедления ударника в мишени // Материалы XVI Международного симпозиума “Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред” им.А.Г.Горшкова. Ярополец, 15-19 февраля 2010 г. Т.2. - Ч.: ГУП «ИПК «Чувашия», 2010. - С.127-144.

Фундаментальные основы баллистического проектирования
2010

Секция 5

Эффективность действия



МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ РЕЗУЛЬТАТОВ ИСПЫТАНИЙ БОЕВОЙ ЧАСТИ НА ОСКОЛОЧНОЕ ДЕЙСТВИЕ

ПОПОВА М.А., ГУБАРЕВ Е.В., ХМЕЛЬНИКОВ Е.А.

Федеральное казенное предприятие «Нижнетагильский институт испытаний металлов»

622015, г. Нижний Тагил, ул. Гагарина, 29

т. (3435) 47-53-02, факс (3435) 47-53-00, E-mail: xeo07@rambler.ru

Существующая методика определения характеристик осколочности неоправданно сложна в условиях повсеместной компьютеризации процессов, поскольку связана с ручной обработкой экспериментальной информации.

На сегодняшний день проблема создания методики, позволяющей с большей эффективностью и достоверностью производить обработку результатов испытаний на осколочное действие, носит актуальный характер.

В качестве объекта исследований была выбрана осесимметричная осколочная боевая часть, предназначенная для комплектования управляемой авиационной ракеты.

На практике для определения характеристик осколочности вычисляют площадь миделева сечения поражающего элемента (ПЭ) измерением массы m и двух размеров наибольшего основания осколка – длины a и ширины b .

Для прямоугольной пластинки и ПЭ естественного дробления площадь S миделева сечения вычисляют по формуле (1):

$$S = \frac{a \cdot b + \frac{m}{\gamma_0} \cdot \frac{a+b}{ab}}{2}, \quad (1)$$

где a, b – соответственно длина и ширина наибольшего основания ПЭ, см;

m – масса ПЭ, г;

γ – плотность металла ПЭ, г/см³.

Для пластинки с ромбическим основанием (сторона a , высота b) по формуле (2):

$$S = \frac{a \cdot b + \frac{1}{2} \frac{m}{\gamma_0}}{2}. \quad (2)$$

Для осколка применяется модель Е.С. Вентцель в виде параллелепи-

педа, $a \times b \times c$ ($a > b > c$) [1]. Эта модель является одной из простых, что обусловило ее широкое применение. Реальная же форма осколка отличается от параллелепипеда тем сильнее, чем большую роль при разрушении играют сдвиговые процессы. На рис. 1, 2 представлены ПЭ различной конфигурации.

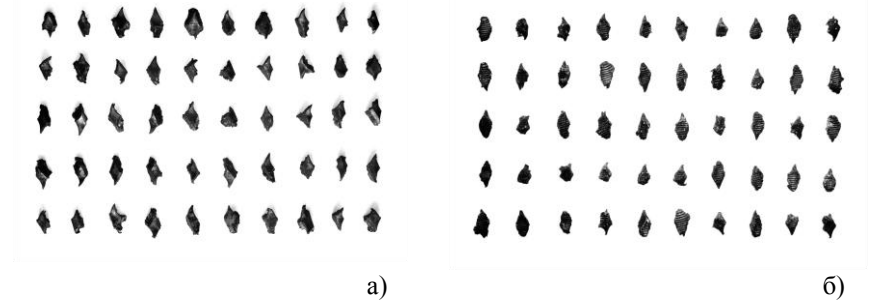


Рисунок 1 – Поражающие элементы с гладкой (а) и резбовой (б) поверхностью из сходственных массовых групп



Рисунок 2 – Поражающие элементы, невошедшие в оценочную группу:
1 ряд – ПЭ весом более 6 грамм; 2 ряд – неотделившиеся ромбические ПЭ полного очертания; 3 ряд – неотделившиеся ромбические ПЭ неполного очертания; 4 ряд – ПЭ по резбке с ракетной части

Предложенная методика по определению характеристик и параметров осколочности основана на обработке цифровых изображений проекций осколков, полученных при подрыве в броняе, и реализована в виде расчетной программы.

Разработанная методика функционирует по следующему алгоритму:

- сортировка ПЭ по весовым группам;
- получение цифровых изображений ПЭ в трех проекциях;
- ввод изображений проекций ПЭ в программу расчета;
- установка уровня преобразования и перевод в бинарное изображение;
- определение количества регионов (регион – область, содержащая непрерывно связанные между собой пиксели как минимум в четырех точках) равного числу проекций на фотографии;
- определение площади каждой проекции ПЭ;
- расчет площади миделева сечения ПЭ;
- определение коэффициента формы и баллистического коэффициента, необходимого для расчета начальной скорости разлета ПЭ.

Для апробирования методики были отобраны в случайном порядке по 50 ПЭ из оценочных групп масс 3-4 и 4-6 г.

Все отсортированные по весовым группам осколки были разложены на листе белой бумаги и сфотографированы в трех проекциях. Для определения масштаба изображения на фотографии помещена мерная линейка. На рис. 3 представлены ПЭ из оценочной группы масс 3-4 г, изображенные в трех проекциях.



Рисунок 3 – ПЭ из оценочной группы масс 3-4 г в трех проекциях

Определение площади S миделева сечения ПЭ производилось по зависимости (3):

$$S = \frac{\sum_{i=1}^n S_i}{n} = \frac{S_1 + S_2 + S_3}{3}, \quad (3)$$

где S_1, S_2, S_3 – площади проекций осколка, см².

На основе расчетов, проводимых по существующей и разработанной методике, были построены гистограммы распределений S для группы масс 3-4 г (рис. 4) и 4-6 г, данные распределения аппроксимированы нормаль-

НЫМ ЗАКОНОМ.

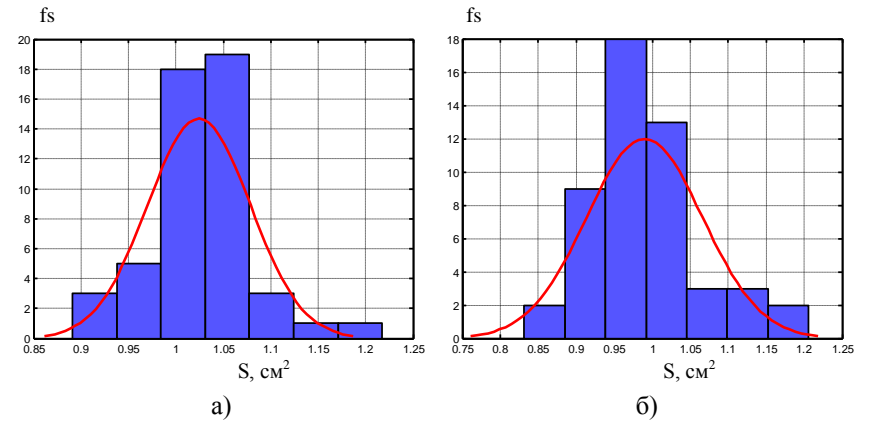


Рисунок 4 – Гистограммы распределений площади миделева сечения ПЭ и аппроксимация распределений нормальным законом:
а – по существующей методике; б – по разработанной методике

В ходе исследований были даны доверительные оценки параметрам генеральной совокупности [2]. По разработанной методике рассеивание значений площади S больше, чем рассеивание значений, вычисленных по существующей методике. Это связано с тем, что предлагаемая методика учитывает реальную форму осколка в его проекциях, в то время как существующая методика идеализирует ее, принимая в качестве математической модели уплощенную пластину с прямоугольным или ромбическим основанием.

Проверка гипотезы о соответствии результатов эксперимента закону нормального распределения по двум критериям согласия Пирсона и Колмогорова позволяет говорить о соответствии эмпирических данных гипотетическому распределению.

Проведенная проверка на однородность средних арифметических значений и дисперсий площади миделева сечения ПЭ, вычисленных по существующей и разработанной методике, показала их неоднородность. Поскольку при оценке эффективности изменений в любом процессе «хорошим» результатом является наличие существенных изменений, разработанную методику можно считать эффективной.

Следует отметить, что предложенная методика отработывалась на группе масс 3-4 г и проверена на группе масс 4-6 г, при этом получены подобные результаты.

Аналогичные исследования проводились по определению коэффициента формы Φ по существующей и разработанной методике.

Гистограммы распределений Φ , построенные по эмпирическим дан-

ным на основе сравниваемых методик для группы масс 4-6 г представлены на рис. 5.

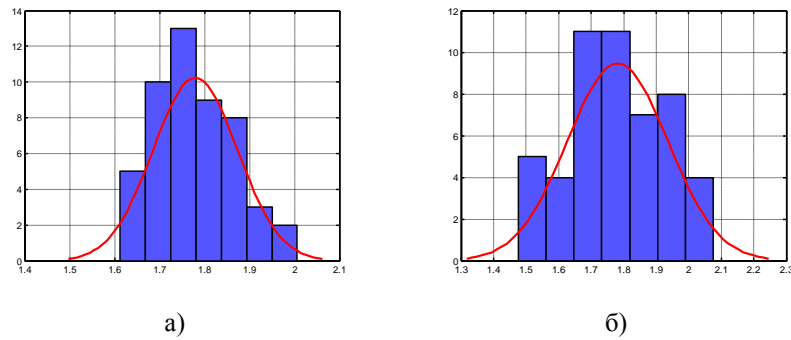


Рисунок 5 – Гистограммы распределений коэффициента формы ПЭ и аппроксимация распределений нормальным законом:
а – по существующей методике; б – по разработанной методике

В ходе дальнейшего исследования было отобрано в случайном порядке еще по 50 ПЭ с гладкой и резьбовой поверхностью из сходственных массовых групп и проведено статистическое сравнение их характеристик (рис. 6).

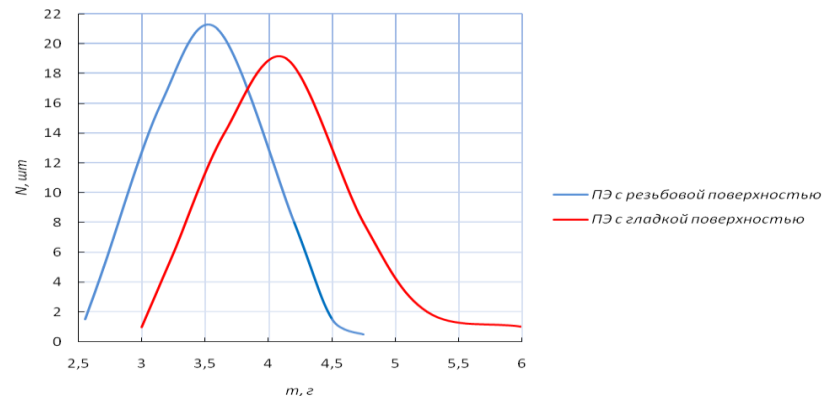


Рисунок 6 – Изменение количества ПЭ с гладкой и резьбовой поверхностью в сходственных массовых группах

Из графика распределения осколков по массовым группам видно, что масса осколков с резбовой поверхностью смещена в меньшую сторону. Из этого следует, что осколки с резбовой поверхностью обладают худшим коэффициентом формы, значит, имеют большее падение скорости на сравнимых дистанциях и меньшую кинетическую энергию, меньше убойный интервал. В результате этого вывода осколки с резбовой поверхностью не были приняты в расчет.

Проверка на идентичность данных ПЭ показала, что ПЭ с гладкой и резбовой поверхностью неидентичны для различных уровней вероятности ($\alpha = 0,90; 0,95; 0,99$).

Для определения начальной скорости ПЭ проводились испытания в щитовой мишенной обстановке (рис. 7).

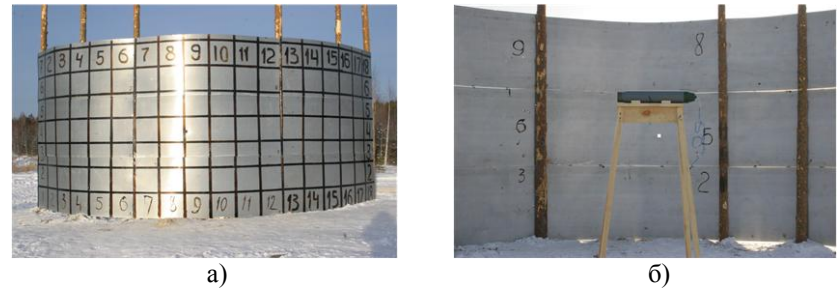


Рисунок 7 – Схема проведения испытаний в щитовой мишенной обстановке:
а – фотография наружной поверхности щита; б – фотография внутренней поверхности щита

План-карта щитовой мишенной обстановки с нанесенными на нее пробоинами представлена на рис. 8.

При обработке киноплёнки, полученной по результатам съемки на двух скоростных кинокамерах СКС, определено время полета каждого ПЭ до щита по формуле (4):

$$t_{k \text{ ср}} = \frac{t_k + t'_k}{2}, \quad (4)$$

где t_k и t'_k – время полета, определенное по результатам съемки, соответственно, основной и дублирующей камерой, с.

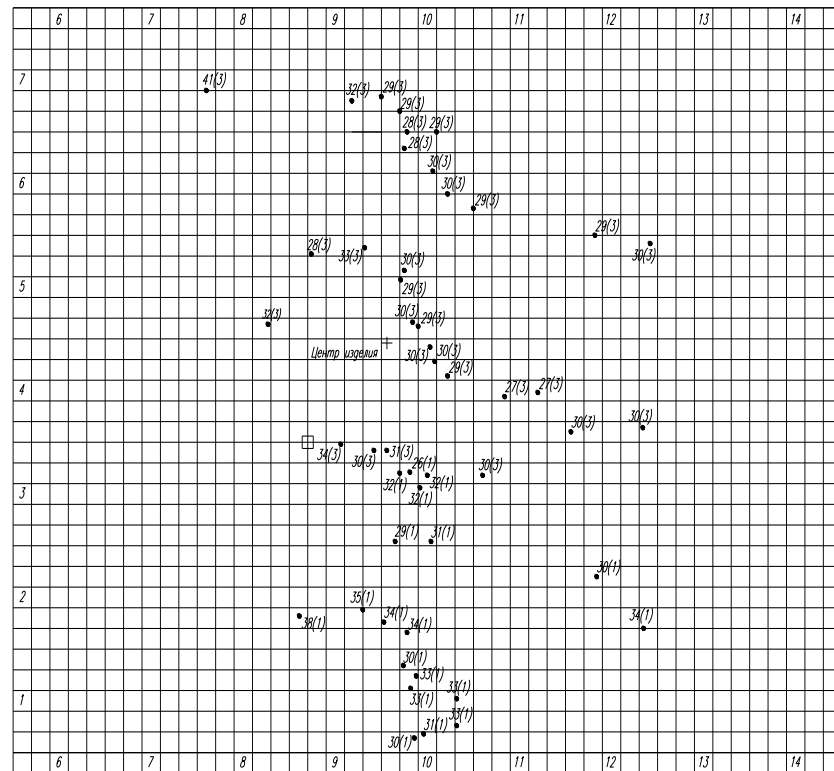


Рисунок 8 – План-карта щитовой мишенной обстановки

Вычислено среднее расстояние до всех пробоин в данной зоне по формуле (5):

$$R_{0j} = \bar{R} \left[1 + \frac{1}{6} \left(\frac{-2}{z_{1j}} + \frac{-2}{z_{2j}} + \frac{-2}{z_{2j}} \right) \right] - r, \quad (5)$$

где \bar{z}_{1j} , \bar{z}_{2j} – относительные ординаты \bar{z} крайних точек на щите средней линии j -зоны;

\bar{R} – средний радиус щита, м;

r – средний радиус боеприпаса, м.

Средняя скорость каждого ПЭ v_k , м/с, по формуле (6):

$$v_k = \frac{R_{0j}}{t_{k \text{ ср}}}, \quad (6)$$

Начальная скорость v_{0k} отдельных ПЭ в зоне по формуле (7):

$$v_{0k} = v_k \frac{e^{\frac{\rho}{\rho_0} R_{0j}} - 1}{a \frac{\rho}{\rho_0} R_{0j}}, \quad (7)$$

где a – средний баллистический коэффициент ПЭ в зоне при нормальной плотности воздуха ρ_0 , соответствующий скорости v , 1/м;

ρ , ρ_0 – плотность воздуха, соответственно, для условий использования баллистического коэффициента и нормальная, кг/м³.

Средняя начальная скорость v_0 , м/с, ПЭ по формуле (8):

$$v_0 = \frac{\sum_{k=1}^{n_v} v_{0k}}{n_v}. \quad (8)$$

Гистограммы распределений начальной скорости разлета ПЭ приведены на рис. 9.

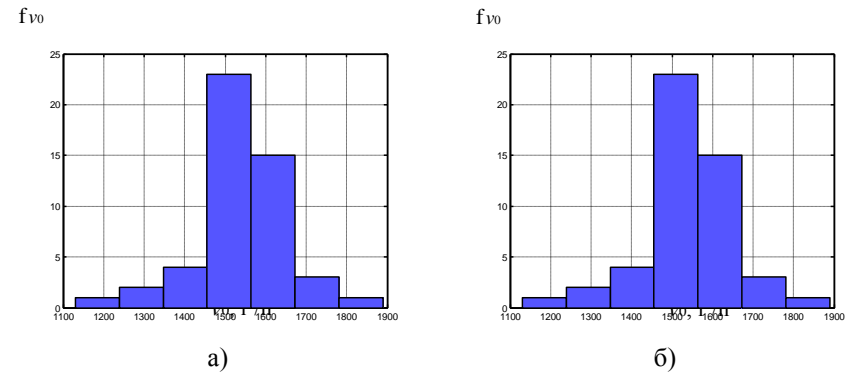


Рисунок 9 – Гистограммы распределений начальной скорости разлета ПЭ v_0 : а – по существующей методике; б – по разработанной методике

Численные значения средней начальной скорости ПЭ в зоне разлета:
 по существующей методике – 1538,8791 м/с;
 по разработанной методике – 1537,6306 м/с.

Выводы.

1. Разработана методика, позволяющая производить обработку результатов испытаний на осколочное действие, при этом время обработки экспериментальной информации сокращается до десяти раз.

2. Предложенная методика, основанная на обработке цифровых изображений проекций ПЭ и реализованная в виде расчетной программы, дает возможность автоматизировать процесс расчета характеристик осколочности.

3. Анализ информации, полученной в ходе обработки экспериментальных данных, показал принципиальную возможность независимого существования разработанной методики и ее использование на родственных предприятиях отрасли.

ЛИТЕРАТУРА

1. Физика взрыва / Под ред. Орленко Л.П. Изд. 3-е, переработанное. В 2 т. Т. 2. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2002. 656 с.
2. Вендер И.И., Пегашкин В.Ф. Теория исследований: учебное пособие. – Нижний Тагил: НТИ(ф) УГТУ-УПИ, 2006. 323 с.

Фундаментальные основы баллистического проектирования
2010

Секция 6

Информационные и управляющие
системы



МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ АВТОМАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ДАТЧИКОВ ДАВЛЕНИЯ

МАРКОВ А.В. СОБОЛЕВ А.М.

*Балтийский государственный технический университет
198005, Санкт-Петербург, 1-я Красноармейская ул., д. 1
т. (812) 259-11-56, E-mail: markov-av@mail.ru*

Современная практика измерения абсолютного давления предъявляет все более, высокие требования к точности, надежности, быстродействию, функциональности рабочих средств измерений. Следует отметить, что в подавляющем большинстве случаев эти требования противоречивы, т.е. улучшение одних характеристик, как правило, достигается за счет недореализации возможностей улучшения других. Так, увеличение функциональных возможностей прибора за счет усложнения снижает его надежность вследствие возрастания числа подверженных отказам элементов. Поэтому разработка измерительной техники должна сопровождаться постоянным поиском компромисса между реализуемыми свойствами прибора, техническими возможностями и экономической целесообразностью.

Развитие техники измерений, постоянное совершенствование конструктивных, технологических и функциональных характеристик приборов, широкое внедрение информационно-измерительных систем приводят к изменению содержания поверочных работ, повышению их сложности и ответственности и, как следствие, к новым повышенным требованиям к поверочной аппаратуре. Так, например, за последние двадцать лет почти на порядок повысилась средняя точность используемых в авиационной промышленности приборов. Главной метрологической проблемой развития рабочих средств измерений была и остается проблема планомерного повышения их точности при сохранении высокой производительности поверочных работ.

Современное рабочее средство измерения абсолютного давления должно обеспечивать быстрый, оперативный контроль метрологических характеристик приборов непосредственно на местах их эксплуатации или в условиях, характерных для их работы на объекте, с минимальными (допускаемыми) погрешностями. Такое средство должно быть инвариантным к условиям измерений и свойствам измеряемых объектов (т.е. ни условия, ни свойства объектов не должны влиять на его характеристики), мобильным (допускающим доставку к месту работы поверяемых приборов), надежным (сохраняющим свои метрологические характеристики в течение достаточно длительного времени) и, наконец, обеспечивать возможность автоматизации поверочных работ.

Исходя из требований, предъявляемых к точности и производительности измерений, структура автоматической системы контроля качества датчиков давления должна включать в себя: чувствительный элемент на базе эталонного датчика, автоматическую систему задания давления и устройство обработки и записи результатов поверки.

Указанная структура автоматической поверочной установки предполагает, что участие оператора (поверителя) сводится только к подготовке установки и прибора к поверке.

Функциональная схема разрабатывалась, исходя из требуемых характеристик к процессу воспроизведения давления. Поверочная установка является цифровой автоматической системой регулирования давления, в которой в качестве чувствительного элемента используется вибрационно-частотный датчик абсолютного давления класса точности 0,01.

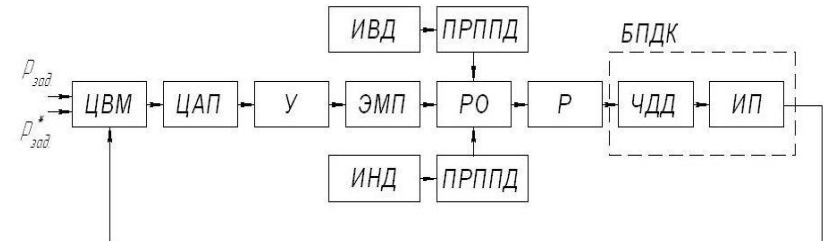


Рисунок 1 – Функциональная схема системы автоматического задания давления

Общая функциональная схема представлена на рис. 1., где введены следующие обозначения: $p_{зад}$ – заданное значение давления; $p'_{зад}$ – заданная скорость изменения давления; ЦАП – цифро-аналоговый преобразователь; У – усилитель; ЭМП – электромеханический преобразователь; РО – регулирующий орган; Р – ресивер; БПДК – блок преобразования давления в код; ЧДД – частотный датчик давления; ИП – измеритель периода; ИВД – источник высокого давления; ИНД – источник низкого давления; ПРППД – пневморегулятор постоянного перепада давления.

На функциональной схеме ЧДД и схеме измерения периода представлены единым блоком преобразования давления в код. Время измерения определяется по следующей формуле:

$$t_{изм} = \frac{N}{F_{чд}},$$

где N – число измеряемых периодов, $F_{чд}$ – частота измеряемого сигнала.

Значение времени измерения $t_{изм.}$ в системе является для устройства заданным минимальным тактом квантования. Это значение определяется требуемой точностью измерения давления и приемлемым значением такта квантования.

Вторым блоком функциональной схемы является цифровая вычислительная машина (ЦВМ), в которой происходит сравнение сигнала управления $p_{зад.}$ с сигналом, поступающим с блока преобразования давления в код, и в соответствии с заданным алгоритмом управления вырабатывается сигнал управления. На выходе ЦВМ требуемая величина управляющей переменной или ее приращение представлены в виде цифрового кода. Поэтому для управления исполнительными устройствами непрерывного типа необходимо в функциональную схему включить цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП) с промежуточной памятью и фиксирующие элементы, называемые иначе экстраполяторами, сохраняющие требуемые значения управляющей переменной в промежутках между тактовыми моментами времени. Желаемое положение непрерывного исполнительного органа обеспечивается подачей на его вход постоянного напряжения.

В качестве исполнительного органа выбран электромеханический преобразователь.

В данном автоматическом задатчике в качестве регулирующего органа используются пневмоклапаны-регуляторы, что позволяет в установленном режиме регулирования давления исключить перетечки рабочего газа из источника высокого давления в ресивер и из ресивера в источник низкого давления. Это способствует уменьшению циркуляции воздуха внутри рабочего объема, что повышает точность задания давления и позволяет в качестве пневмопитания использовать баллон с ограниченным количеством сжатого воздуха.

Ресивер – орган управления, к которому подключены вход частотного датчика и выход регулирующего органа.

Построение математической модели системы было сведено к разбиению ее на отдельные звенья и к описанию этих звеньев. Последнее может осуществляться либо аналитически в виде уравнений, связывающих входные и выходные величины звена, либо графически в виде характеристик, описывающих ту же связь. Математическая модель должна представлять собой упрощенное отображение действительности и содержать информацию о реальном объекте в удобной форме. Если модель слишком сложна, ее полезность становится сомнительной.

В принципе для расчета пневматической части разрабатываемого устройства должна использоваться полная система уравнений газовой динамики. Однако решение такой системы уравнений в общем виде представляет сложную задачу. Вместе с тем в большинстве практически важ-

ных случаев достаточно удовлетворительное соответствие с опытом дают рассматриваемые далее расчеты, основанные на принятии ряда упрощающих допущений:

- для ресиверов, в которых течение воздуха происходит при малых перепадах давлений, не учитывается влияние на характеристики дросселей изменения плотности воздуха, связанное с изменением давления;
- считается, что расходные характеристики дросселей на неустановившихся режимах работы такие же, как и в статических условиях;
- берутся средние для ресивера величины давлений и считается, что давление не меняется от одной точки ресивера к другой;
- вводятся упрощающие допущения в отношении процессов изменения состояния воздуха в ресивере (эти процессы зависят от условий теплопередачи через стенки);
- при исследовании переходных процессов в ресивере в ряде случаев используется линеаризованные характеристики дросселей.

В разрабатываемом устройстве регулирующий орган используется для преобразования перепада давлений в движение частиц подводимого газа. В пневмоавтоматике дроссель является единственным элементом, преобразующим потенциальную энергию сжатого газа в кинетическую энергию газового потока. Все информационные преобразования сигналов пневматических управляющих устройств выполняются в основном за счет этой энергии.

В качестве регулирующего органа выбран щелевой дроссель. Конструктивное исполнение щелевых дросселей весьма разнообразно, но их объединяет наличие зазора между двумя поверхностями или кромками, где и осуществляется дросселирование потока газа.

Если разность давлений до и после дросселя мала по сравнению с абсолютными величинами этих давлений, следовательно, невелика скорость воздуха в канале и эта скорость мало меняется по длине канала и, если не учитывать дополнительные потери при формировании потока на начальном участке канала дросселя, можно считать, что разность давлений до и после дросселя и весовой секундный расход воздуха связаны между собой линейной зависимостью. Эта зависимость определяется следующей формулой:

$$G = C_{\pi} \cdot \Delta p ,$$

где C_{π} - коэффициент, постоянный для данного дросселя, Δp - разность давлений, G - весовой секундный расход воздуха.

Величина радиального зазора δ_{π} связана с величиной χ переме-

щения стержня от положения, при котором $\delta_{щ} = 0$, зависимостью $\delta_{щ} = X \cdot \sin \alpha_{д}$.

Весовой секундный расход воздуха через дроссели этого типа рассчитывается по формуле:

$$G = C \cdot X^3,$$

$$\text{где } C = \frac{\pi \cdot D_{щ} \cdot \sin^3 \alpha_{д} \cdot \rho \cdot g \cdot \Delta p}{12 \cdot \mu \cdot l},$$

где $D_{щ}$ - средний диаметр щелевого зазора; $\delta_{щ}$ - ширина щели; ρ - плотность воздуха, принимаемая в данном случае постоянной; μ - динамический коэффициент вязкости; g - ускорение свободного падения; l - длина канала дросселя; Δp - разность давлений; X - перемещение стержня дросселя.

При изготовлении стержня и втулки щелевого дросселя из одного и того же материала размеры зазора практически не зависят от температуры. Однако величина радиального зазора может значительно меняться с изменением температуры, если стержень и втулка изготовлены из материалов с различными коэффициентами температурного расширения. При применении таких дросселей оказывается возможным компенсировать влияние температуры на величину расхода воздуха или, наоборот, специально вводить при необходимости корректировку расходных характеристик по температуре.

Для повышения эффективности работы регулирующего органа пневматической системы, в частности автоматических задатчиков абсолютного давления, применяются пневморегуляторы постоянного перепада давлений. Они обеспечивают равные величины перепада давлений на дросселирующих участках регулирующего органа. Это позволяет достичь идентичности расходных характеристик при наполнении и опустошении замкнутого объема.

Дифференциальное уравнение движения подвижных частей пневморегулятора постоянного перепада давления:

$$m \left(\frac{d^2 x}{dt^2} \right) + f \left(\frac{dx}{dt} \right) = pS - F,$$

где m - приведенная масса воздуха и подвижных частей пневморегулятора; f - вязкое трение; S - площадь мембраны; $F = cx$ - упругая противодействующая сила; c - упругость мембраны и пружины; x - перемещение подвижных частей пневморегулятора.

Следовательно, передаточная функция пневморегуляторов имеет вид:

$$W(s) = \frac{x(s)}{p(s)} = \frac{S}{ms^2 + fs + c} = \frac{K}{\left(\frac{1}{\omega_0}\right)^2 s^2 + \frac{2\xi}{\omega_0} s + 1},$$

где $\omega_0 = \left(\frac{c}{m}\right)^{0.5}$ - резонансная частота пневморегулятора; $\xi = \frac{f}{2m^{0.5}}$ - коэффициент затухания; $K = S/c$ - передаточный коэффициент пневморегулятора; s - оператор Лапласа.

На основании уравнений Менделеева-Клайперона можно записать зависимость изменения давления для объема V :

$$\frac{V}{RT} \cdot \frac{dp}{dt} = G_1 - G_2$$

где p - давление воздуха в камере; V - объем камеры; R - газовая постоянная; T - абсолютная температура воздуха; G_1 и G_2 - расход воздуха через пневморегулятор постоянного перепада давления.

Учитывая, что при открытом регулирующем органе высокого давления регулирующий орган низкого закрыт и наоборот, вышеприведенное уравнение примет вид:

$$\frac{V}{RT} \cdot \frac{dp}{dt} = \begin{cases} G_1, & \text{при } X > 0 \\ G_2, & \text{при } X < 0 \end{cases} \quad (1)$$

Процесс изменения давлений считаем изотермическим. Дросселирование в пневморегуляторах осуществляется за счет изменения кольцевого щелевого зазора. При ламинарном течении воздуха расход может быть рассчитан по формуле Пуазейля:

$$G_1 = C_{л1}(p_1 - p_B), \quad (2)$$

$$\text{где } C_{л1} = \frac{\pi \cdot D_{щ} \cdot \delta_{щ}^3 \cdot \rho \cdot g}{12 \cdot \mu \cdot l}, \quad p_B = p_X + \Delta$$

где $D_{щ}$ - средний диаметр щелевого зазора сопла, $\delta_{щ}$ - ширина щели, ρ - плотность воздуха, μ - динамический коэффициент вязкости, g - ускорение свободного падения, l - длина канала сопла. Аналогично:

$$G_2 = C_{л2}(p_H - p_2), \quad (3)$$

$$\text{где } p_H = p_X - \Delta$$

При ламинарном течении воздуха можно принять, что средняя плотность газа в канале высокого давления $\rho_{ср.1}$ и в канале низкого давления $\rho_{ср.2}$ рассчитываются по нижеприведенным формулам:

$$p = p_{cp.1} = \frac{p_1 + p_B}{2 \cdot g \cdot R \cdot T}$$

$$p = p_{cp.2} = \frac{p_H + p_2}{2 \cdot g \cdot R \cdot T}$$

Тогда выражение (2) принимает вид:

$$G_1 = \frac{K_1}{2 \cdot l} (p_1^2 - p_B^2), \quad (4)$$

где $K_1 = \frac{\pi \cdot D_{ш} \cdot \delta_1^3}{12 \cdot \mu \cdot R \cdot T}$

Аналогично запишем уравнение (3):

$$G_2 = \frac{K_2}{2 \cdot l} (p_H^2 - p_2^2), \quad (5)$$

где $K_2 = \frac{\pi \cdot D_{ш} \cdot \delta_2^3}{12 \cdot \mu \cdot R \cdot T}$

Представим уравнения (4) и (5) в виде:

$$\begin{cases} G_1 = C_1 \cdot \delta_1^3, \text{ при } X > 0 \\ G_2 = C_2 \cdot \delta_2^3, \text{ при } X < 0 \end{cases}$$

где $\begin{cases} C_1 = \frac{\pi \cdot D_{ш}}{24 \cdot \mu \cdot R \cdot T \cdot l} \cdot (p_1^2 - p_B^2), \text{ при } X > 0 \\ C_2 = \frac{\pi \cdot D_{ш}}{24 \cdot \mu \cdot R \cdot T \cdot l} \cdot (p_H^2 - p_2^2), \text{ при } X < 0 \end{cases}$

Переходя к уравнениям в отклонениях, сохраним для отклонений обозначения, данные для переменных. Отбросив члены ряда Тейлора выше первого порядка малости, можно получить:

$$G_1 = 3C_1 \cdot \delta_{max1}^2 \delta_1, \text{ при } X > 0$$

$$G_2 = 3C_2 \cdot \delta_{max2}^2 \delta_2, \text{ при } X < 0$$

Учитывая, что $\delta = aX$ (a - коэффициент связывающий перемещение подвижной части пневморегулятора X и величину щелевого зазора δ), можно записать:

$$G_1 = C_{11} X_1, \text{ при } X > 0 \quad (6)$$

$$G_2 = C_{22} X_2, \text{ при } X < 0 \quad (7)$$

где $C_{11} = 3C_1 \cdot \delta_{max1}^2 a_1$, $C_{22} = 3C_2 \cdot \delta_{max2}^2 a_2$

Подставив уравнения (6) и (7) в формулу (1), получим:

$$\frac{V}{RT} \cdot \frac{dp}{dt} = \begin{cases} C_{11} X_1, \text{ при } X > 0 \\ C_{22} X_2, \text{ при } X < 0 \end{cases} \quad (8)$$

Применив преобразование Лапласа к уравнению (8), можно полу-

чить:

$$\frac{V}{RT} sp_1 = C_{11} X_1$$

$$\frac{V}{RT} sp_2 = C_{22} X_2$$

Следовательно, передаточные функции определяются следующими выражениями:

$$W_1(s) = \frac{p_1(s)}{X_1(s)} = \frac{K_{\text{пер.1}}}{s}$$

$$\text{где } K_{\text{пер.1}} = \frac{C_{11}RT}{V},$$

$$W_2(s) = \frac{p_2(s)}{X_2(s)} = \frac{K_{\text{пер.2}}}{s}$$

$$\text{где } K_{\text{пер.2}} = \frac{C_{22}RT}{V}.$$

В качестве исполнительного органа выбран электромагнитный преобразователь электрического сигнала в угловое перемещение.

Электромагнитный пропорциональный преобразователь представляет собой электромеханическое устройство, в котором благодаря взаимодействию потока возбуждения и потока обмотки управления якорь поворачивается пропорционально току управления, а при отсутствии последнего занимает нейтральное положение. Динамические характеристики электромагнита определяются уравнениями для тока в обмотке управления и для моментов на валу якоря.

$$\left. \begin{aligned} L_{\text{э}} \frac{di_y(t)}{dt} + (R_{\text{э}} + R_{\text{а}}) \cdot i_y(t) &= u_y(t) - K_{\Omega\text{э}} \frac{d\alpha(t)}{dt} \\ J'_{\text{дэ}} \frac{d^2\alpha(t)}{dt^2} + F'_{\text{дэ}} \frac{d\alpha(t)}{dt} + C_{\text{дэ}} \cdot \alpha(t) &= K_{\text{мэ}} \cdot i_y(t) + M_{\text{сэ}}(t) \end{aligned} \right\}$$

где $R_{\text{э}}$ и $L_{\text{э}}$ - активное сопротивление и индуктивность обмотки управления электромагнита; $R_{\text{а}}$ - активное сопротивление выходного каскада электронного усилителя; $F'_{\text{дэ}}$ и $J'_{\text{дэ}}$ - приведенные к валу электромагнита коэффициент вязкого трения и момент инерции ротора электромагнита и регулирующего элемента; $C_{\text{дэ}}$ - коэффициент пропорциональности между моментом, приложенным к валу электромагнита и углом поворота его ротора; $i_y(t)$ - ток в обмотке управления; $\alpha(t)$ - угол поворота ротора; $u_y(t)$ - напряжение на выходе электронного усилителя;

$M_{cy}(t)$ - статический момент на валу электромагнита.

В реальных конструкциях электромагнитов обратная связь через противо-э.д.с. проявляется слабо ($K_{\Omega\Theta} = 0$), что позволяет, ее не учитывать.

Коэффициенты $K_{M\Theta}$ и $C_{д\Theta}$ в электромагнитах с позиционирующим зазором и подмагничиванием от независимого источника существенным образом зависят от тока возбуждения I_B . Если позиционирование осуществлено с помощью торсиона, то $C_{д\Theta} = const$. В преобразователях с постоянными магнитами коэффициенты $K_{M\Theta}$ и $C_{д\Theta}$ являются постоянными величинами.

При подстановке численных значений в математические модели получим исходные данные для расчета:

$$S = 5 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2; c = 10 \frac{\text{Н}}{\text{М}}; V = 10^{-3} \text{ м}^3; m = 7 \cdot 10^{-2} \text{ кг};$$

$$f = 2 \cdot 10^{-5}; D_{ш} = 10 \cdot 10^{-3} \text{ м}; R = 287 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}};$$

$$\delta_{ш} = 2 \cdot 10^{-3} \text{ м}; T = 293 \text{ К}; l = 10 \cdot 10^{-3} \text{ м}; \mu = 1.82 \cdot 10^{-5} \frac{\text{Н} \cdot \text{с}}{\text{М}^2};$$

$$p_x = 10132 \text{ Па}; p_1 = 10132 \text{ Па}; p_2 = 10132 \text{ Па}; p_n = 0 \text{ Па}; p_v = 20265 \text{ Па}.$$

На рис. 2 представлена линеаризованная в окрестности рабочей точки математическая модель автоматической системы задания давления.

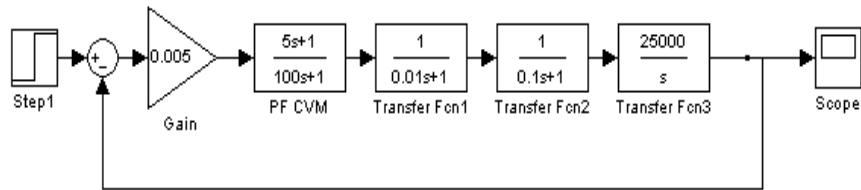


Рисунок 2 – Модель автоматического задатчика давления без учета пневморегулятора

На рис. 3 показана динамическая характеристика автоматической системы задания давления.

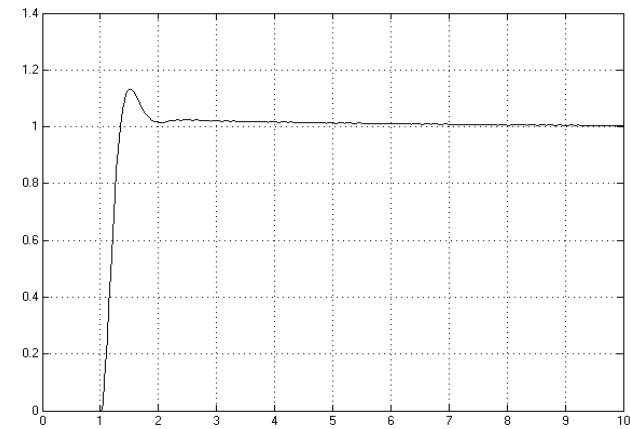


Рисунок 3 – Динамическая характеристика автоматического задатчика давления без учета пневморегулятора

На рис. 4 представлена линеаризованная в окрестности рабочей точки математическая модель пневморегуляторов постоянного перепада давлений.

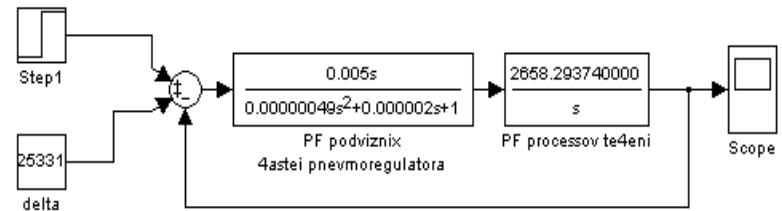


Рисунок 4 – Модель пневморегулятора

На рис. 5 показана динамическая характеристика пневморегуляторов.

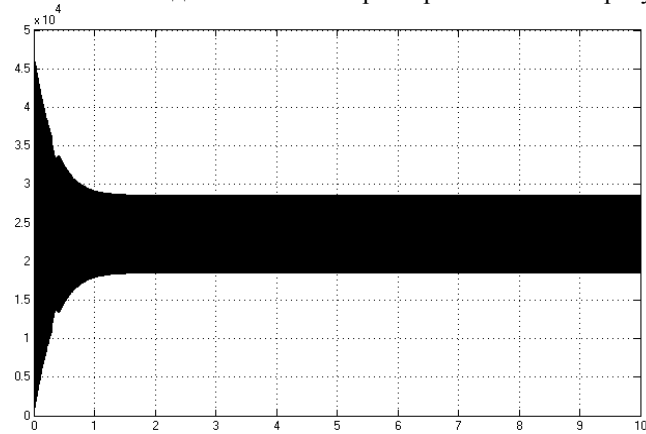


Рисунок 5 – Динамическая характеристика переходного процесса пневморегулятора

С теоретической и практической точки зрения представляет интерес математическая модель, которая в режиме реального времени и во всём диапазоне задаваемых давлений учитывает совместное функционирование основного контура управления и пневморегуляторов постоянного перепада, которые являются малым контуром управления.

На рис. 6 представлена двухконтурная математическая модель автоматической системы задания давления.

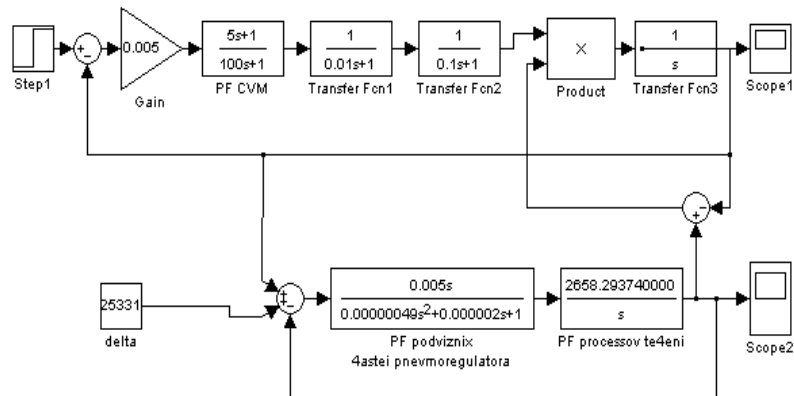


Рисунок 6 – Модель автоматического задатчика давления с учетом пневморегулятора

На рис. 7 показана динамическая характеристика автоматической системы задания давления.

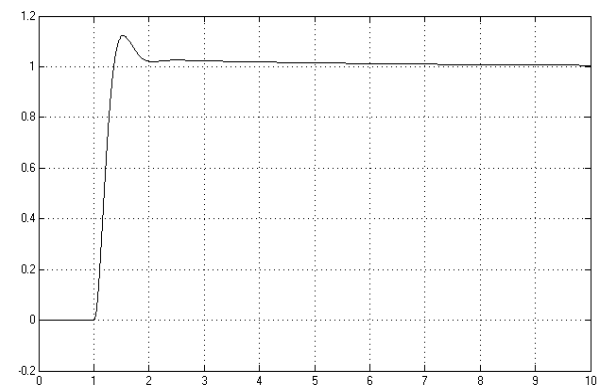


Рисунок 7 – Динамическая характеристика автоматического задатчика давления с учетом пневморегулятора

Полученные математические модели, позволяют достаточно точно описать динамические процессы, происходящие в рабочих полостях контролируемых приборов измерения давления воздуха.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА МОДЕЛЕЙ ПРИ ИДЕНТИФИКАЦИИ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕМЕНТОВ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПО ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМ ДАННЫМ

ПОНЯТСКИЙ В.М.

*ГУП "Конструкторское бюро приборостроения"
300001, г. Тула, ул. Щегловская засека
тел. (4872) 46-94-16, факс (4872) 42-61-39,
E-mail: kbkedr@tula.net, pwmru@rambler.ru*

1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

По результатам испытаний системы управления по построенным математическим моделям элементов осуществляется оценка экспериментальных характеристик этих элементов [1-5]. При этом возникает проблема выбора наилучшей из нескольких моделей, полученных при помощи разных методов идентификации или при разных настройках одного и того же метода.

Пусть для оценки коэффициентов модели нелинейного объекта с линейным наблюдателем используется непрерывный алгоритм инвариантного погружения [6-9]:

$$\dot{\mathbf{x}}_o(t) = f[\mathbf{x}_o(t), \mathbf{u}(t), t] + \mathbf{P}(t)\mathbf{H}(t)\Psi_v^{-1}(t)[\mathbf{z}(t) - \mathbf{H}(t)\mathbf{x}_o(t)]; \quad (1)$$

$$\dot{\mathbf{P}}(t) = \mathbf{G}[\mathbf{x}_o(t), t]\Psi_w\mathbf{G}^T[\mathbf{x}_o(t), t] + \mathbf{P}(t)\frac{\partial f^T[\mathbf{x}_o(t), \mathbf{u}, t]}{\partial \mathbf{x}_o(t)} + \frac{\partial f[\mathbf{x}_o(t), \mathbf{u}, t]}{\partial \mathbf{x}_o(t)}\mathbf{P}(t) - \mathbf{P}(t)\mathbf{H}^T(t)\mathbf{H}(t)\mathbf{P}(t), \quad (2)$$

где \mathbf{x}_o - оценка расширенного вектора состояний; \mathbf{P} - корреляционная матрица ошибок фильтрации; начальные условия: $\mathbf{x}(t_0) = \mu_{x_0}$; $\mathbf{P}(t_0)$.

Дискретный алгоритм инвариантного погружения имеет вид:

$$\mathbf{x}_o(k+1|k) = \varphi[\mathbf{x}_o(k), \mathbf{u}, k]; \quad (3)$$

$$\mathbf{x}_o(k+1) = \mathbf{x}_o(k|k-1) + \mathbf{P}(k)\mathbf{H}^T(k)\mathbf{V}_v^{-1}(k) \cdot \{\mathbf{z}(k+1) - \mathbf{H}(k)\mathbf{x}_o(k|k-1)\}.$$

Уравнение для дисперсии:

$$\mathbf{P}(k+1|k) = \Gamma[\mathbf{x}_o(k)]\mathbf{V}_w\Gamma^T[\mathbf{x}_o(k)] + \frac{\partial \varphi[\hat{\mathbf{x}}_o(k), \mathbf{u}, k]}{\partial \hat{\mathbf{x}}_o(k)}\mathbf{P}(k)\frac{\partial \varphi^T[\hat{\mathbf{x}}_o(k), \mathbf{u}, k]}{\partial \hat{\mathbf{x}}_o(k)}. \quad (4)$$

$$\mathbf{P}(k+1) = \mathbf{P}(k+1|k) - \mathbf{P}(k+1|k)\mathbf{H}^T(k+1)[\mathbf{H}(k+1) \cdot \mathbf{P}(k+1|k)\mathbf{H}^T(k+1) + \mathbf{V}_v(k+1)] \times \mathbf{H}(k+1) \cdot \mathbf{P}(k+1|k).$$

Для решения указанной проблемы предлагается осуществлять оперативную и полную проверку качества получаемых моделей. Проверка качества включает несколько этапов. На первом этапе осуществляется оценка адекватности полученных моделей. На втором этапе для адекватных моделей рассчитываются показатели точности.

Пусть имеется 1 моделей Q_1, Q_2, \dots, Q_1 , полученных в результате идентификации динамического объекта. По каждой модели получены невязки e_1, e_2, \dots, e_n , где n – число наблюдений. Весь диапазон наблюдений разбивается на K интервалов с выборкой > 100 значений. Для каждого интервала проводится проверка качества моделей. Для каждой модели определяются интервалы адекватности и на этих интервалах определяется наилучшая модель.

2 ОПЕРАТИВНАЯ ПРОВЕРКА КАЧЕСТВА ПОЛУЧАЕМЫХ МОДЕЛЕЙ

Этап 1. Проверка адекватности модели

Критерий Фишера

Проверка гипотезы об адекватности модели осуществляется по критерию Фишера:

$$F_{расч} = \frac{S_{ad}}{S_y},$$

где $F_{расч}$ – расчетное значение критерия Фишера;

$S_{ad} = \frac{1}{N-m} \sum_{i=1}^N (y_i - y_{i,mod})^2$ – дисперсия адекватности; N – число дискретных значений выхода модели; m – число значимых параметров модели; y_i – реальное значение выхода объекта на i -том такте; $y_{i,mod}$ – значение

выхода объекта на i -том такте, рассчитанное по модели;

$S_y = \frac{1}{N-m} \sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2$ – дисперсия значений реального выходного сигнала; $\bar{y} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i$ – выборочное среднее выходного сигнала.

Модель считается адекватной экспериментальным данным, если выполняется неравенство:

$$F_{расч} < F_{табл},$$

где $F_{табл}$ – табличное значение критерия Фишера при выбранном уровне значимости и двух степенях свободы: числителя $\nu_1 = N - m$ и знаменателя $\nu_2 = N - 1$.

Уровень значимости обычно выбирается из ряда: 0,05; 0,01; 0,005; 0,001.

Этап 2. Оценка качества коэффициентов модели

Проверка значимости коэффициентов модели (неравенство их нулю) осуществляется по статистическому критерию Стьюдента.

Критерий Стьюдента для оценки параметра модели a_{oj} :

$$t_{j \text{ расч}} = \frac{|a_{oj}|}{S_{aj}},$$

где $t_{j \text{ расч}}$ – расчетное значение критерия Стьюдента для оценки параметра модели a_{oj} ; $j=1, m$, m – число оцениваемых коэффициентов модели; S_{aj} – оценка дисперсии параметра a_{oj} , определяемая, например, по матрице дисперсии-ковариации **P** (2) или (4). Если среди оцениваемых с помощью алгоритмов (1) или (3) коэффициентов a_{oj} имеются обратные величины, то дополнительно рассчитываются уравнения для дисперсии **P** (2) или (4) с прямыми величинами a_{oj} .

Гипотезу о значимости оценки a_{oj} не следует отвергать, если выполняется условие:

$$t_{j \text{ расч}} < t_{\text{табл}},$$

где $t_{\text{табл}}$ – табличное значение критерия Стьюдента при выбранном уровне значимости и числе степеней свободы $\nu = N - m$; $j=1, m$, m – число оцениваемых коэффициентов модели.

Незначимость оценки a_{oj} означает, что соответствующий коэффициент может быть исключен из рассматриваемой модели, так как гипотеза о том, что $a_j = 0$ не отвергается.

Оценка доверительного интервала

Для каждого коэффициента модели a_{oj} определяется доверительный интервал:

$$D = a_{oj} \pm t S_{aj},$$

где t – квантиль, S_{aj} – оценка дисперсии параметра a_{oj} , например, по матрице дисперсии-ковариации **P**.

По величине доверительного интервала делается вывод об эффективности полученной оценки коэффициента модели.

Данные критерии могут быть использованы в качестве экспресс-анализа качества полученной модели. Для полной оценки адекватности могут

быть использованы следующие критерии, позволяющие провести анализ невязки и выявить причину неадекватности модели.

3 ПОЛНАЯ ПРОВЕРКА КАЧЕСТВА ПОЛУЧАЕМЫХ МОДЕЛЕЙ

Этап 1. Оценка адекватности модели

Модель считается адекватной, если полученную невязку e_1, e_2, \dots, e_n , можно считать белым шумом, то есть независимыми нормально распределенными случайными величинами с нулевым средним и одинаковыми дисперсиями. Невязка должна обладать свойствами независимости уровней, их случайности, соответствия нормальному закону распределения и равенства нулю средней ошибки. Проверка адекватности проводится с помощью соответствующих критериев, направленных на исследование отдельных свойств ряда невязок.

Критерий восходящих и нисходящих серий (анализ на наличие тренда)

Для проверки случайности уровней ряда будем использовать критерий серий. Среди модификаций критерия серий наиболее удачной с точки зрения соотношения между сложностью и надежностью, является критерий “восходящих” и “нисходящих” серий. По результатам сравнения двух последних уровней ряда составляется последовательность из нулей и единиц. Если $e(t+1) - e(t) > 0$, в последовательности ставится ноль, в противном случае – единица:

$$dt = \begin{cases} 1 & \text{если } e_t + 1 > e_t; \\ 0 & \text{в остальных случаях.} \end{cases}$$

Если исходный ряд представляет собой случайную последовательность, то продолжительность самой длинной серии (K_{\max}), т.е. последовательности, состоящей из идущих подряд нулей или единиц, должна быть небольшой, а общее число серий V – достаточно большим.

Подсчитывается число серий V , состоящих только из нулей или только из единиц.

При гипотезе, что ошибки - независимые одинаково распределенные случайные величины, V имеет асимптотически нормальное распределение с параметрами:

$$M(V) = (2n - 1)/3,$$

$$D(V) = (16n - 29)/90.$$

Вычисляем значение v^* числа серий исследуемого ряда. Сигналом нарушения адекватности модели будет малое число серий. Определяется вероятность:

$$P1 = P(V \leq v^*).$$

Вероятность $P1$ - есть функция распределения случайной нормально распределенной величины V с известными параметрами.

$$P1 = P(V \leq v^*) = F(v^*) = \int_{-\infty}^{v^*} f(V)dV = \int_{-\infty}^{v^*} \frac{1}{\sqrt{2\pi D(V)}} \exp\left(-\frac{(v - M(V))^2}{2D(V)}\right) dV .$$

На рисунке 1 представлен график функции плотности распределения случайной нормально распределенной величины V с заданными параметрами при $n = 100$.

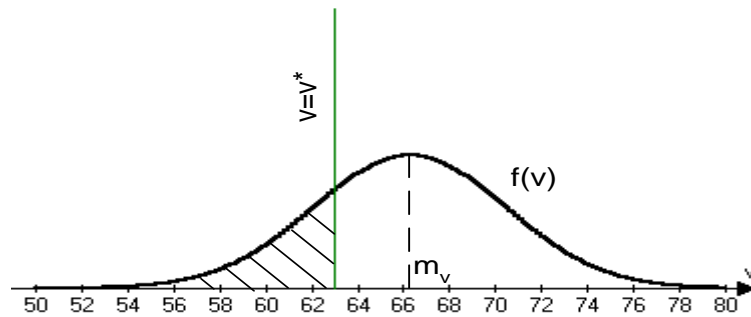


Рисунок 1 - График функции плотности распределения случайной величины V

Необходимо получить расчетное значение функции распределения случайной величины V при некотором конкретном значении статистики v^* .

Рассмотрим метод решения полученного интеграла. Функция плотности распределения нормальной случайной величины $f(v)$ не поддается непосредственному интегрированию, то есть первообразную нельзя представить в элементарных функциях. Для определения $F^*(v)$ воспользуемся численным интегрированием.

Интеграл является несобственным. Бесконечную границу интегрирования заменяем достаточно большим числом a так, чтобы принятое значение интеграла отличалось от исходного на некоторый малый остаток, то есть:

$$\int_{-\infty}^b f(x) dx = \int_a^b f(x) dx + \mathbf{R}$$

где $\mathbf{R} = \int_{-\infty}^a f(x) dx \rightarrow 0$.

Так как подынтегральная функция $f(v)$ есть плотность вероятности

нормально распределенной случайной величины, воспользуемся «правилом трех сигм»: для нормально распределенной случайной величины рассеивание (с точностью до долей процента) укладывается на участке $m \pm 3\sigma$ (рисунок 2).

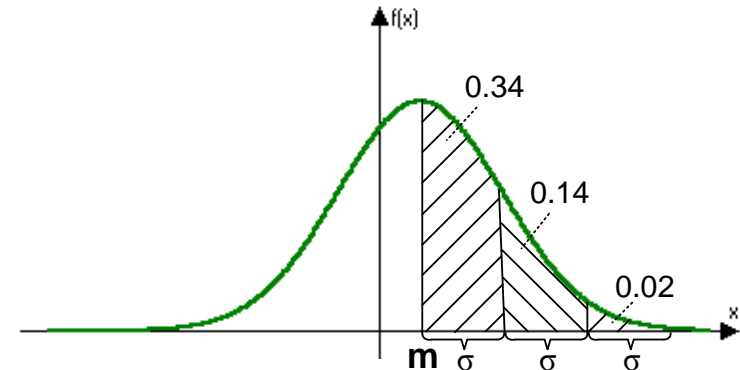


Рисунок 2 – «правило трех сигма»

Вероятность выпадения случайной величины на отрезок, отстоящий от m более чем на 4σ равна нулю с точностью до 0,001 %.

Заменим несобственный интеграл на приближенное выражение:

$$P1 = \int_{M(v)-4\sigma}^{v^*} f(V)dV = \int_{M(v)-4\sigma}^{v^*} \frac{1}{\sqrt{2\pi D(V)}} \exp\left(-\frac{(v - M(V))^2}{2D(V)}\right) dV ,$$

где $\sigma = \sqrt{D(V)}$

Так как вид подынтегральной функции задан аналитически, то целесообразно воспользоваться методом численного интегрирования, в основе которого лежат интерполяционные многочлены нулевой степени. Погрешность численного интегрирования определяется шагом разбиения, уменьшая его, можно добиться необходимой точности.

Критерий Фостера-Стьюарта (анализ характера изменения математического ожидания и среднеквадратического отклонения)

Критерий ориентирован на проверку наличия тенденции к изменению средней и дисперсии исследуемого ряда данных.

Строятся ряды:

$$u_t = \begin{cases} 1 & \text{если } e_t > e_1, \dots, e_{t-1} \\ 0 & \text{в остальных случаях} \end{cases}$$

$$r_t = \begin{cases} 1 & \text{если } e_t < e_1, \dots, e_{t-1} \\ 0 & \text{в остальных случаях} \end{cases}$$

Данный критерий содержит две статистики S и G .

$$s^* = S = \sum (u_t + r_t); \quad g^* = G = \sum (u_t - r_t).$$

Если ошибки e_t независимы и имеют одинаковые распределения, то S и G асимптотически нормальны и имеют независимые распределения. При этом:

$$M(G) = 0, \quad D(G) = 2 \cdot \ln(n) - 0.8456,$$

$$M(S) = 2 \cdot \ln(n) - 0.8456, \quad D(S) = \ln(n) - 3.4253$$

Статистика G служит для обнаружения тенденций в средней ряда, статистики S - для обнаружения тенденций изменения дисперсии.

Вычисляем значения этих статистик g^* и s^* для исследуемого ряда ошибок. Сигналом нарушения адекватности модели будут большие значения g^* и большие по модулю значения s^* . Определяются вероятности:

$$P2 = P(S \geq s^*);$$

$$P3 = P(|G| \geq |g^*|).$$

Рассмотрим метод определения вероятности $P2$.

$$P2 = P(S \geq s^*) = 1 - P(S < s^*),$$

где $P(S < s^*)$ - есть функция распределения случайной величины S . Так как случайная величина S распределена асимптотически нормально, то справедливо равенство:

$$F(s^*) = P(S < s^*) = \int_{-\infty}^{s^*} f(s) ds = \frac{1}{\sqrt{2\pi D(S)}} \int_{-\infty}^{s^*} \exp\left(-\frac{(s-M(S))^2}{2D(S)}\right) ds$$

Таким образом, получаем искомую вероятность $P2$ в виде:

$$P2 = 1 - P(S < s^*) = 1 - F(s^*)$$

Необходимо получить расчетное значение функции распределения случайной величины S при некотором конкретном значении статистики s^* .

На рисунке 3 представлен график плотности вероятности распределения нормальной случайной величины с параметрами $M(S) = 2 \cdot \ln(n) - 0.845$ и $D(S) = \ln(n) - 3.4253$, при $n=100$.

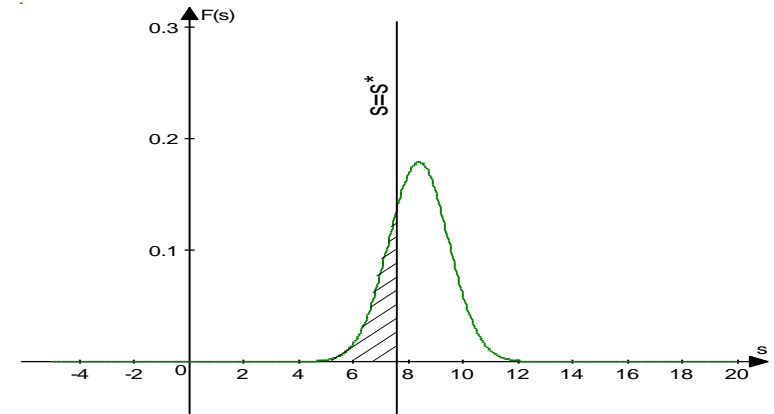


Рисунок 3 - График функции плотности распределения случайной величины S

Исходный интеграл преобразуем к виду:

$$F(s^*) = \int_{M(S)-4\sigma}^{s^*} f(s)ds = \frac{1}{\sqrt{2\pi D(S)}} \int_{M(S)-4\sigma}^{s^*} \exp\left(-\frac{(s-M(S))^2}{2D(S)}\right) ds$$

где $\sigma = \sqrt{D(S)}$

Рассмотрим метод определения вероятности $P3$.

$$P1 = P(|G| \geq |g^*|) = 1 - P(|G| < |g^*|),$$

где $P(|G| < |g^*|)$ – есть функция распределения модуля случайной величины G .

Так как случайная величина G распределена асимптотически нормально, то справедливо равенство:

$$F(g^*) = P(G < g^*) = \int_{-\infty}^{g^*} f(g)dg = \frac{1}{\sqrt{2\pi D(G)}} \int_{-\infty}^{g^*} \exp\left(-\frac{(g-M(G))^2}{2D(G)}\right) dg$$

Функция распределения модуля нормальной случайной величины G с нулевым математическим ожиданием имеет следующий вид:

$$F(|g^*|) = P(|G| < |g^*|) = \int_0^{g^*} \tilde{f}(g)dg = \frac{2}{\sqrt{2\pi D(G)}} \int_0^{g^*} \exp\left(-\frac{g^2}{2D(G)}\right) dg$$

На рисунке 4 представлен график плотности распределения нормальной случайной величины G с параметрами $M(G)=0$ и

$D(G) = 2 \cdot \ln(n) - 0.8456$ и график плотности распределения ее модуля при $n=100$.

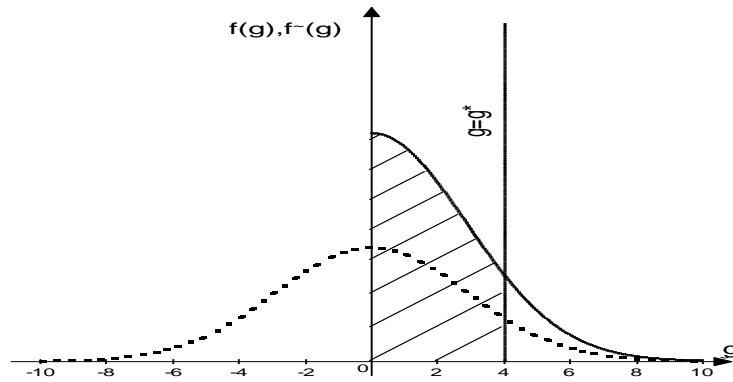


Рисунок 4 - График функции плотности распределения случайной величины G и ее модуля $|G|$

Таким образом, получаем искомую вероятность $P3$ в виде:

$$P3 = P(|G| \geq |g^*|) = 1 - F(|g^*|)$$

Критерий Хи-квадрат (нормальный закон распределения невязки)

Дана выборка из N независимых наблюдений случайной величины x с плотностью $p(x)$. Сгруппируем N наблюдений по K интервалам, называемым интервалами группировки, которые в совокупности образуют гистограмму частот. Число наблюдений, попавших в i -й интервал, называется наблюдаемой частотой i -го интервала: обозначим ее f_i . Число наблюдений, которые могли бы попасть в i -й интервал, если бы истинной плотностью x была $p(x)$, называется ожидаемой частотой i -го интервала; обозначим ее F_i . Далее расхождение между наблюдаемой и ожидаемой частотами в каждом интервале равно $f_i - F_i$. Для того чтобы измерить общее расхождение по всем интервалам, нормируются квадраты расхождений соответствующими ожидаемыми частотами и берется их сумма: получается выборочная статистика

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^K \frac{(f_i - F_i)^2}{F_i}$$

Распределение величины χ^2 приближенно совпадает с χ_n^2 - распределением. Число степеней свободы n в этом случае равно K минус число различных независимых линейных ограничений, наложенных на наблюдения. Существует одно такое ограничение, связанное с тем, что

частота в последнем интервале группировки полностью определяется частотами всех остальных интервалов. Если при сравнении плотностей одновременно подбираются параметры гипотетического распределения с целью достижения наилучшего согласия с гистограммой частот, построенной по выборочным данным, то добавляется по одному ограничению на каждый независимый параметр гипотетической плотности, который будет определяться для достижения этого согласия. В нашем случае, когда гипотетическая плотность – нормальная, с неизвестным средним значением и дисперсией, появляются два дополнительных ограничения, поскольку для подбора нормальной плотности придется оценить два параметра (среднее значение и дисперсию). Следовательно, при применении критерия согласия Хи-квадрат для проверки нормальности, число степеней свободы в χ^2 равно $n = K - 3$.

Известны два основных способа применения критерия согласия хи-квадрат. Первый заключается в выборе таких интервалов группировки, которые обеспечивают равенство ожидаемых частот для всех интервалов. Второй способ состоит в выборе интервалов одинаковой длины. Для проверки нормальности с помощью критерия хи-квадрат обычно используются интервалы равной длины. Если стандартное отклонение выборочных данных равно s , то часто берут интервалы группировки длиной $\Delta x \approx 0.4s$. Более существенное требование заключается в том, что ожидаемые частоты для каждого интервала группировки должны быть достаточно большими, с тем чтобы χ_n^2 с приемлемой точностью приближала величину из формулы (2). Обычно рекомендуется добиваться выполнения условия $F_i > 3$ для всех интервалов. При проверке нормальности, когда частоты, соответствующие хвостам распределения, быстро убывают, обычно в качестве первого и последнего интервалов выбирают интервалы, простирающиеся до $-\infty$ и $+\infty$ соответственно, причем должно выполняться указанное выше требование $F_i, F_K > 3$.

Итак, применим критерий согласия Хи-квадрат для проверки нормальности ряда невязок.

$$\text{Вычисляем выборочное среднее: } \bar{e} = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n e_t$$

$$\text{и выборочное СКО: } \sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum (e_t - \bar{e})^2} .$$

Разобьем все множество действительных чисел на 8 интервалов.

Интервалы разбиения ряда для критерия Хи-квадрат представлены в таблице 1.

Таблица 1.

Интервалы разбиения ряда критерия Хи-квадрат

Номер интервала	Границы интервала	Вероятность P_i
1	$(-\infty; \bar{e} - 1.2\sigma)$	0.1151
2	$(\bar{e} - 1.2\sigma; \bar{e} - 0.8\sigma)$	0.0968
3	$(\bar{e} - 0.8\sigma; \bar{e} - 0.4\sigma)$	0.1327
4	$(\bar{e} - 0.4\sigma; \bar{e})$	0.1554
5	$(\bar{e}; \bar{e} + 0.4\sigma)$	0.1554
6	$(\bar{e} + 0.4\sigma; \bar{e} + 0.8\sigma)$	0.1327
7	$(\bar{e} + 0.8\sigma; \bar{e} + 1.2\sigma)$	0.0968
8	$(\bar{e} + 1.2\sigma; +\infty)$	0.1151

Величина P_i равна вероятности попадания в соответствующий интервал нормально распределенной случайной величины со средним \bar{e} и СКО σ .

Для каждого интервала определяется величина v_i - число членов ряда, попавших в этот интервал. Вычисляется статистика:

$$\chi_n^2 = \sum_{i=1}^8 \frac{(v_i - np_i)^2}{np_i}.$$

Если e_t имеет нормальное распределение, то распределение величины χ_n^2 стремится к распределению Хи-квадрат с пятью степенями свободы ($8-3=5$).

Вычисляем χ^* - значение статистики для ряда. Сигналом нарушения нормальности считаем большие значения χ^* . Определяем вероятность

$$P4 = P(\chi_n^2 \geq \chi^*);$$

$$P4 = P(\chi_n^2 \geq \chi^*) = 1 - P(\chi_n^2 < \chi^*).$$

Вероятность $P(\chi_n^2 < \chi^*)$ равна функции распределения случайной величины Хи-квадрат.

$$F_{\chi^2}(\chi^*) = P(\chi_n^2 < \chi^*) = \int_0^{\chi^*} f_{\chi^2}(\chi) d\chi.$$

Плотность вероятности случайной величины, распределенной по закону Хи-квадрат с k степенями свободы имеет вид:

$$f_{\chi}(x) = \frac{1}{2^{\frac{k}{2}} \Gamma\left(\frac{k}{2}\right)} e^{-\frac{x}{2}} x^{\frac{k}{2}-1},$$

при $x > 0$ $f_{\chi}(x) = 0$, при $x \leq 0$, где $\Gamma\left(\frac{k}{2}\right)$ - гамма функция.

При $k = 5$, гамма функция принимает значение $\Gamma\left(\frac{k}{2}\right) = \frac{3}{4}\sqrt{\pi}$, функция плотности вероятности при $k = 5$ принимает следующий вид:

$$f_{\chi}(x) = \frac{1}{3\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x}{2}} x^{\frac{3}{2}}.$$

В итоге получаем:

$$F_{\chi^2}(\chi^*) = P(\chi_n^2 < \chi^*) = \int_0^{\chi^*} \frac{1}{3\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{\chi}{2}} \chi^{\frac{3}{2}} d\chi.$$

На рисунке 5 представлен график функции плотности распределения величины хи-квадрат с пятью степенями свободы.

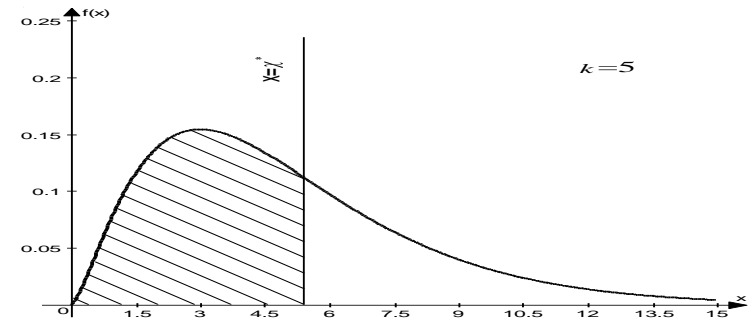


Рисунок 5 - График функции плотности распределения величины Хи-квадрат с пятью степенями свободы

Таким образом, искомую вероятность будем рассчитывать по формуле:

$$P4 = 1 - P(\chi_n^2 < \chi^*) = 1 - \int_0^{\chi^*} \frac{1}{3\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{\chi}{2}} \chi^{\frac{3}{2}} d\chi$$

Для расчета интеграла будем использовать метод прямоугольников.

Критерий равенства нулю невязки (анализ на равенство нулю математического ожидания)

Рассматривается гипотеза, что выборочные данные являются незави-

симыми нормально распределенными случайными величинами с нулевым средним.

Вычисляем выборочное среднее:

$$\bar{e} = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n e_t$$

и выборочное СКО:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum (e_t - \bar{e})^2} .$$

Вычисляется статистика:

$$t = \frac{\bar{e}}{\sigma} \sqrt{n}$$

Если ошибки e_t - независимые нормально распределенные величины с нулевым средним, то t имеет распределение Стьюдента с $k = (n - 1)$ степенями свободы.

Пусть t^* - конкретные значения этой статистики. Вычисляется вероятность

$$P5 = P(|T| \geq |t^*|).$$

Рассмотрим метод расчета вероятности $P3$:

$$P5 = P(|T| \geq |t^*|) = 1 - P(|T| < |t^*|),$$

здесь вероятность $P(|T| < |t^*|)$ есть модуль функции распределения Стьюдента с $k = (n - 1)$ степенями свободы. При $k \rightarrow \infty$ распределение Стьюдента стремится к нормальному распределению с параметрами $k = (n - 1)$, $m = 0$ и $\sigma = 1$, при $k > 30$ распределение Стьюдента весьма близко к нормальному. Так как на исходные данные наложено ограничение $n \geq 100$, то параметр k не может принимать значение меньше, чем $k = 99$. Таким образом, для расчета вероятности критерия можно использовать нормальную функцию распределения без значащих потерь точности результатов.

$$P(T < t^*) = F_{St} = \Phi_0 = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{t^*} e^{-\frac{t^2}{2}} dt .$$

Функция распределения модуля нормальной функции имеет следующий вид:

$$\tilde{\Phi}_0 = \frac{2}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{x^*} \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right) dx.$$

На рисунке 6 представлен график функции плотности распределения модуля нормальной случайной величины с параметрами $M=0$ и $\sigma=1$ при $n=100$.

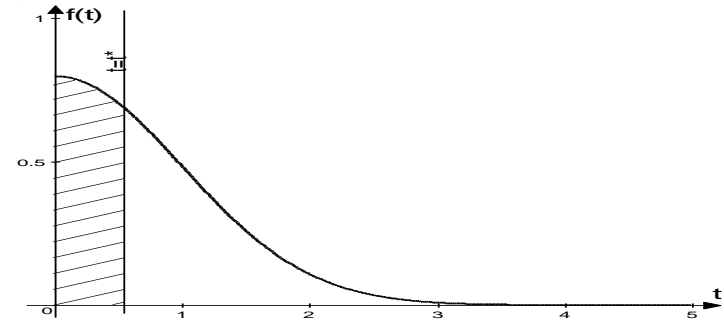


Рисунок 6 - График плотности распределения модуля нормальной функции

Таким образом, формула расчета вероятности $P5$ принимает следующий вид:

$$P5 = P(|T| \geq |t^*|) = 1 - P(|T| < |t^*|) = 1 - \frac{2}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{x^*} \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) dt$$

Статистика Дарбина-Уотсона (анализ на наличие корреляции)

Анализ ряда невязок на наличие систематической составляющей проводится с помощью d -критерия Дарбина-Уотсона, в соответствии с которым вычисляется статистика d :

$$d = \frac{\sum_{t=2}^n (e_t - e_{t-1})^2}{\sum_{t=1}^n e_t^2}$$

При независимости ошибок d имеет асимптотически нормальное распределение, с параметрами:

$$M(d) \approx 2; \quad D(d) \approx 1,5 - 4/n.$$

Рассчитываем d^* - конкретное значение статистики по данному ряду невязок. Большие значения d^* (коэффициент превышает 2) свидетельствуют об отрицательной корреляции соседних значений исходного ряда,

малые значения d^* - о положительной корреляции. Вычисляется вероятность:

$$P6 = P(|d - 2| \geq |d^* - 2|).$$

Рассчитаем вероятность $P4$:

$$P6 = P(|d - 2| \geq |d^* - 2|) = 1 - P(|d - 2| < |d^* - 2|).$$

Вероятность P - есть функция распределения модуля нормальной случайной величины с параметрами $M(d - 2)$, $D(d)$.

$$P(d < d^*) = \frac{1}{\sqrt{2\pi D(d)}} \int_{-\infty}^{d^*} e^{-\frac{(d-M(d))^2}{2D(d)}} dd - \text{функция распределения случайной величины } D.$$

$$P(|d - 2| < |d^* - 2|) = \frac{1}{\sqrt{2\pi D(d)}} \int_{-\infty}^{d^*-2} e^{-\frac{(d-M(d-2))^2}{2D(d)}} dd - \text{функция распределения случайной величины } D - 2.$$

Графики функций плотности распределения случайной величины D и $D - 2$, при $n = 100$ представлены на рисунке 5. Функция распределения модуля нормальной случайной величины с параметрами $M(d - 2)$, $D(d)$ имеет вид (рисунок 7):

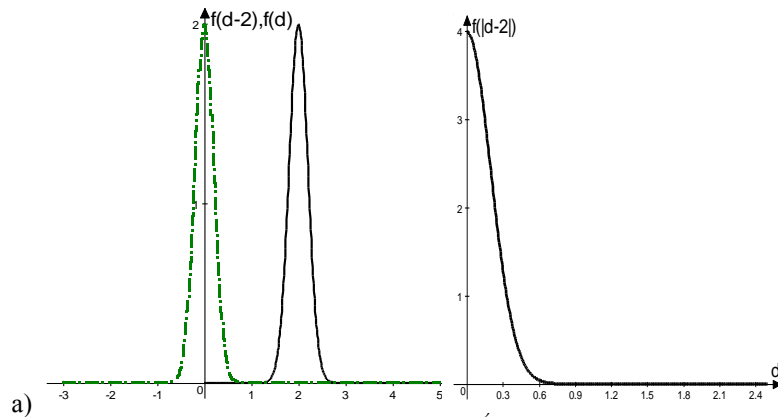


Рисунок 7 – Графики функций плотности распределения случайной величины D и $D - 2$ (а) и модуля нормальной случайной величины $D - 2$ (б)

$$P(d-2 < |d^* - 2|) = \frac{1}{\sqrt{2\pi D(d)}} \int_0^{d^*-2} e^{-\frac{(d-M(d-2))^2}{2D(d)}} dd$$

Получаем следующую формулу расчета вероятности P4:

$$P6 = 1 - P(d-2 < |d^* - 2|) = 1 - \frac{1}{\sqrt{2\pi D(d)}} \int_0^{d^*-2} e^{-\frac{(d-M(d-2))^2}{2D(d)}} dd$$

Критерий «чемодана» (анализ на наличие корреляции)

Вычисляем оценки ковариаций исходного ряда ошибок

$$\hat{R}_k = \frac{1}{n-k} \sum_{t=k+1}^n e_t e_{t-k}, \quad k=0, 1, 2, \dots$$

Искомая статистика:

$$Q = (n-m) \sum_{k=1}^m \frac{(\hat{R}_k)^2}{(\hat{R}_0)^2}$$

При независимости e_t случайная величина Q имеет асимптотическое распределение Хи-квадрат с m степенями свободы.

В отличие от предыдущего критерия, который проверяет корреляцию только соседних значений ряда, критерий "чемодана" проверяет наличие возможной корреляции вплоть до сдвига на m периодов времени. Целое m выбирается из условия: $m = \min(n/3, 12)$

Так как значение n ограничено снизу $n \geq 100$, то $m = 12$

Пусть q^* - вычисленное конкретное значение статистики Q .

Большие значения q^* свидетельствуют о наличии корреляции между остатками.

Определяется вероятность:

$$P7 = P(Q \geq q^*) = 1 - P(Q < q^*)$$

Вероятность $P(Q < q^*)$ равна функции распределения случайной величины хи-квадрат с $m = 12$ степенями свободы.

$$F_{\chi^2}(q^*) = P(Q < q^*) = \int_0^{q^*} f_{\chi^2}(q) dq$$

Плотность вероятности случайной величины, распределенной по закону Хи-квадрат с k степенями свободы имеет вид :

$$f_{\chi}(x) = \frac{1}{2^{\frac{k}{2}} \Gamma\left(\frac{k}{2}\right)} e^{-\frac{x}{2}} x^{\frac{k}{2}-1}, \text{ при } x > 0$$

$$f_{\chi}(x) = 0, \text{ при } x \leq 0,$$

где $\Gamma\left(\frac{k}{2}\right)$ - гамма функция. При $k = m = 12$, гамма функция принимает значение $\Gamma\left(\frac{k}{2}\right) = \Gamma\left(\frac{12}{2}\right) = (n-1)! = 5! = 120$, функция плотности вероятности при $k = 12$ принимает следующий вид:

$$f_{\chi}(x) = \frac{1}{7680} e^{-\frac{x}{2}} x^5$$

На рисунке 8 приведен график функции плотности распределения случайной величины Хи-квадрат с 12 степенями свободы.

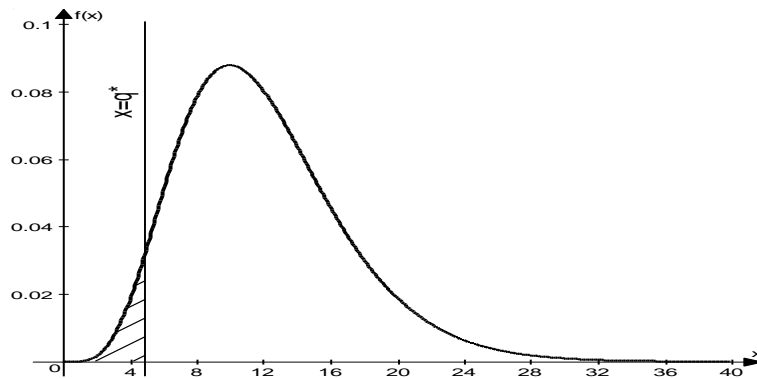


Рисунок 8 - График функции плотности распределения величины Хи-квадрат с 12 степенями свободы

Получим следующую формулу расчета искомой вероятности:

$$P7 = P(Q \geq q^*) = 1 - \int_0^{q^*} \frac{1}{7680} e^{-\frac{x}{2}} x^5 dx$$

Расчет интегрального показателя адекватности

Перечисленные выше критерии определяют набор вероятностей P_1, P_2, \dots, P_7 , с помощью которых принимаем решение об адекватности модели. Данные вероятности рассчитываются на основании асимптотического распределения каждого критерия и дают корректные результаты только при больших объемах выборки ($n \geq 100$). Интегральный показатель адекватности модели определим следующим образом:

$$Ad = \min_{1 \leq i \leq 7} P_i$$

Модель считается адекватной, если значение интегрального показателя $Ad \geq Ad_{\min}$. Значение Ad_{\min} является уровнем значимости принятия гипотезы каждого критерия.

Значение 0.05 является уровнем значимости принятия гипотезы каждого критерия. В программе это число предлагается задать пользователю (по умолчанию выставлено 0.05).

Этап 2. Оценка точности модели и выбор наилучшей

В качестве таких показателей предлагается использовать следующие величины: среднеквадратическое отклонение невязки, средняя по модулю относительная невязка, максимальная абсолютная невязка, максимальная относительная невязка.

После того, как выбраны адекватные модели, для каждой модели рассчитываются показатели точности. В качестве таких показателей выбираем следующие величины:

- среднеквадратическая величина невязки:

$$\varepsilon_1 = \frac{1}{n} \sqrt{\sum_t e_t^2};$$

- средняя по модулю относительная величина невязки:

$$\varepsilon_2 = \frac{1}{n} \sum_t \left| \frac{e_t}{y} \right|;$$

- максимальная абсолютная величина невязки:

$$\varepsilon_3 = \max(|e_t|);$$

- максимальная относительная величина невязки:

$$\varepsilon_4 = \max\left(\left| \frac{e_t}{y} \right|\right).$$

- $\varepsilon_5 = 1 - r_1$, где $r_1 = \frac{\sum (X_t^o X_t)}{\sum |X_t^o X_t|}$ - коэффициент Лукашина корреляции

приростов; $X_t = y_t - y_{t-1}$; $X_t^o = y_t^o - y_{t-1}^o$;

- $\varepsilon_6 = 1 - r_2$, где $r_2 = \frac{\sum (z_t^o z_t)}{\sum |z_t^o z_t|}$ - коэффициент Лукашина корреляции

темпов приростов; $Z_t = \frac{y_t - y_{t-1}}{y_{t-1}}$; $Z_t^o = \frac{y_t^o - y_{t-1}}{y_{t-1}}$.

Для каждой модели рассчитывается обобщенный критерий точности

$$G = \sum_{j=1}^6 \alpha_j \varepsilon_j, \text{ где } \varepsilon_1, \dots, \varepsilon_6 - \text{показатели точности, } \alpha_1, \dots, \alpha_6 - \text{коэффициенты}$$

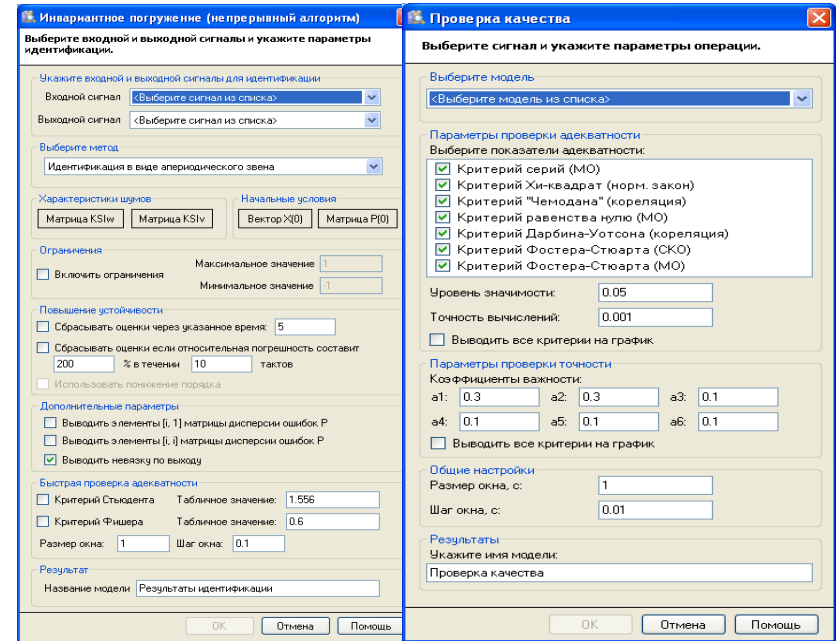
важности каждого показателя точности. Коэффициенты важности α_j зависят от физического смысла процесса и их можно задавать из экспертных соображений.

Оптимальной или наилучшей считается та модель, для которой величина G - критерия минимальна.

4. ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ

Предложенный подход по оценке качества модели реализован в программном комплексе Идентификация [10].

Режим оперативной оценки качества идентифицируемой модели реализован непосредственно в процедуре оценки коэффициентов модели с помощью процедуры «Инвариантный метод» (рисунок 9а). Режим полной оценки качества идентифицируемой модели реализован в отдельной процедуре (рисунок 9б).



а) б)
 Рисунок 9 – Меню: а) процедуры «Инвариантное погружение»; б) процедуры «Проверка качества модели»

5. РЕЗУЛЬТАТЫ

В соответствии с предложенной технологией проведена оценка характеристик сервопривода системы управления летательным аппаратом по экспериментальным данным. На рисунке 10 приведены исходные данные (входной и выходной сигналы).

Проведена структурная идентификация по методу, использующему функцию потерь. Получена импульсная переходная функция (рисунок 11). Оценка порядка системы приведена на рисунке 12. По результатам структурной идентификации можно сделать вывод, что сервопривод можно описать моделью 1 или 2 порядка.

На рисунке 13 приведены результаты оценки параметров (коэффициента передачи, постоянной времени, частоты входного сигнала и фазовой задержки) сервопривода с использованием метода инвариантного погружения (в виде аperiodического и колебательного звена) и преобразования Фурье (в виде аperiodического звена). Проведено сравнение полученных моделей по их адекватности (см. рисунок 14) и точности (см. рисунок 15).

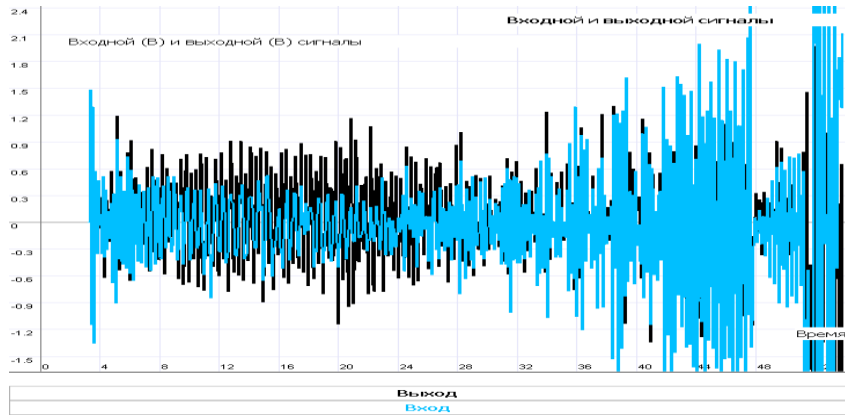


Рисунок 10 – Исходные данные

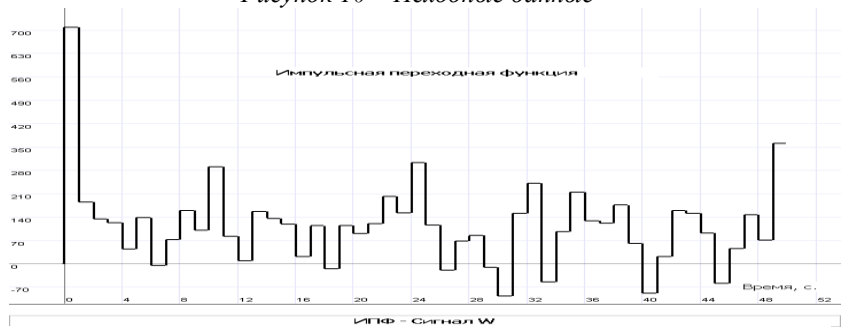


Рисунок 11 – Импульсная переходная функция

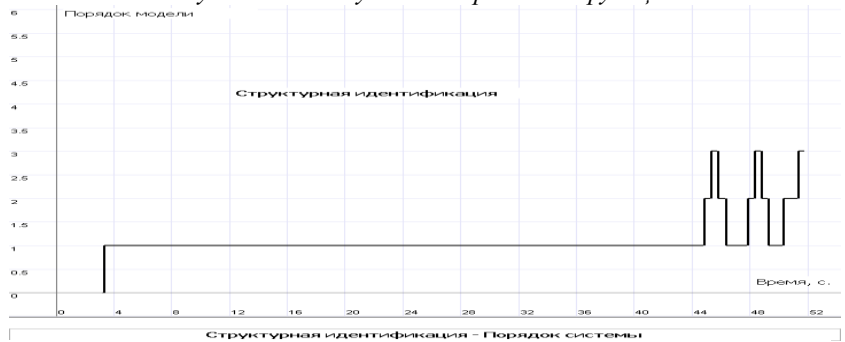
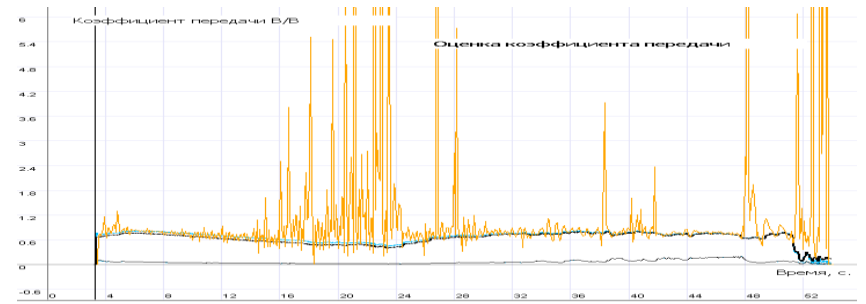
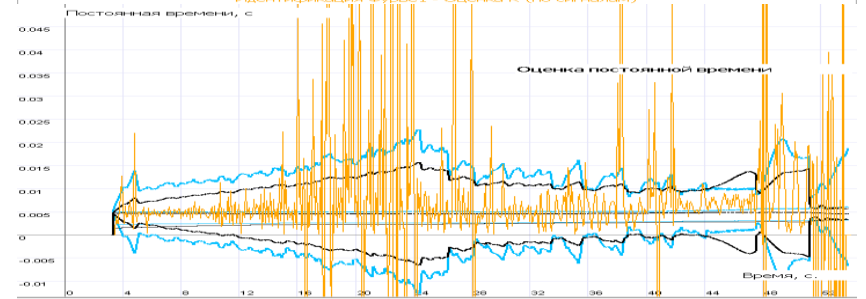


Рисунок 12 – Оценка порядка модели



Оценки(апер.) - Оценка K
 Оценки(апер.) - Верхняя граница доверит. интервала оценки K
 Оценки(апер.) - Нижняя граница доверит. интервала оценки K
 Оценки(колеб.) - Оценка K
 Оценки(колеб.) - Верхняя граница доверит. интервала оценки K
 Оценки(колеб.) - Нижняя граница доверит. интервала оценки K
 Оценки(колеб.) - критерий Стьюдента оценки K
 Идентификация Фурье1 - Оценка K (по сигналам)



Оценки(апер.) - Оценка T
 Оценки(апер.) - Верхняя граница доверит. интервала оценки T
 Оценки(апер.) - Нижняя граница доверит. интервала оценки T
 Оценки(колеб.) - Оценка T
 Оценки(колеб.) - Верхняя граница доверит. интервала оценки T
 Оценки(колеб.) - Нижняя граница доверит. интервала оценки T
 Оценки(колеб.) - критерий Стьюдента оценки T
 Идентификация Фурье1 - Оценка T (по сигналам)



Оценки(колеб.) - Оценка E
 Оценки(колеб.) - Верхняя граница доверит. интервала оценки E
 Оценки(колеб.) - Нижняя граница доверит. интервала оценки E
 Оценки(колеб.) - критерий Стьюдента оценки E

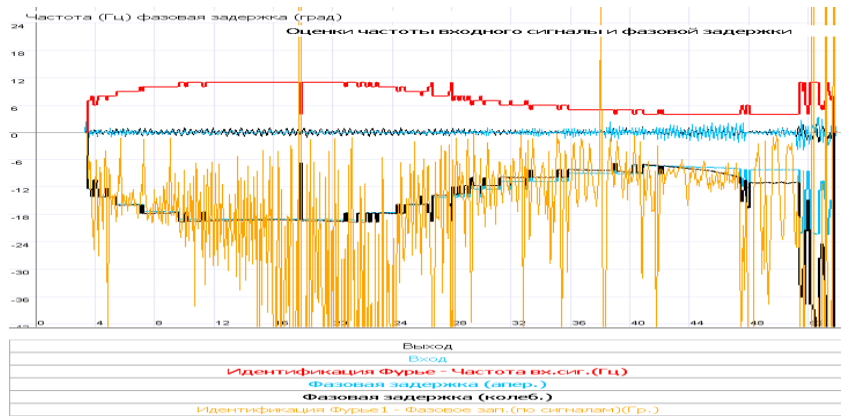
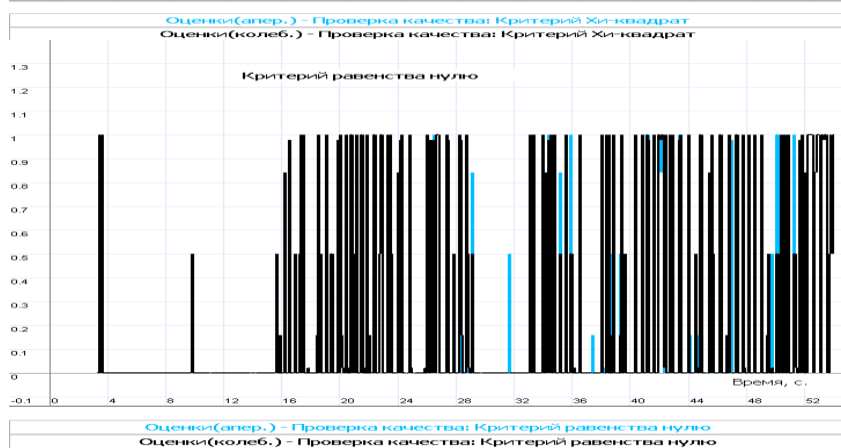
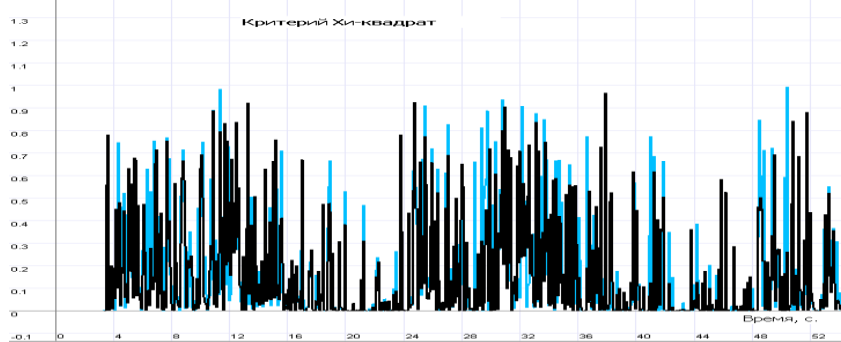
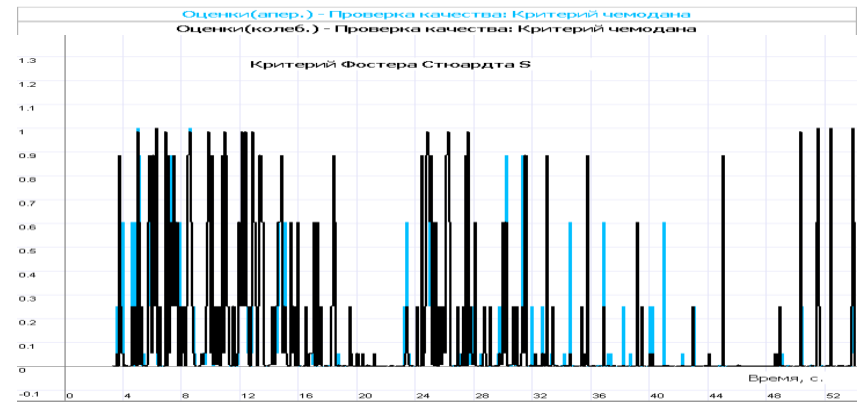
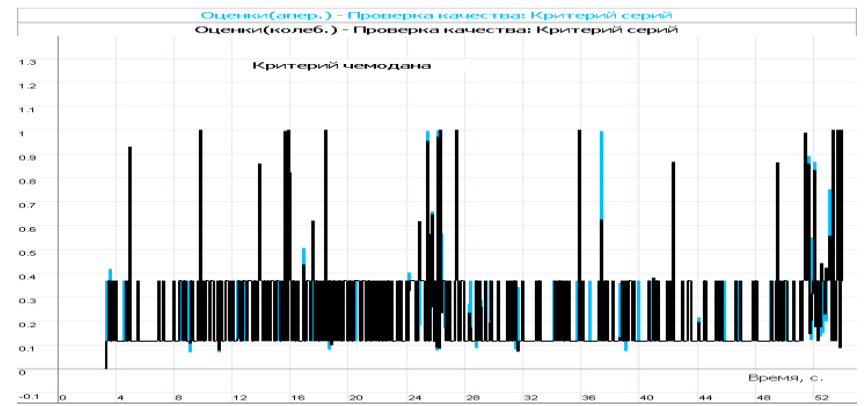
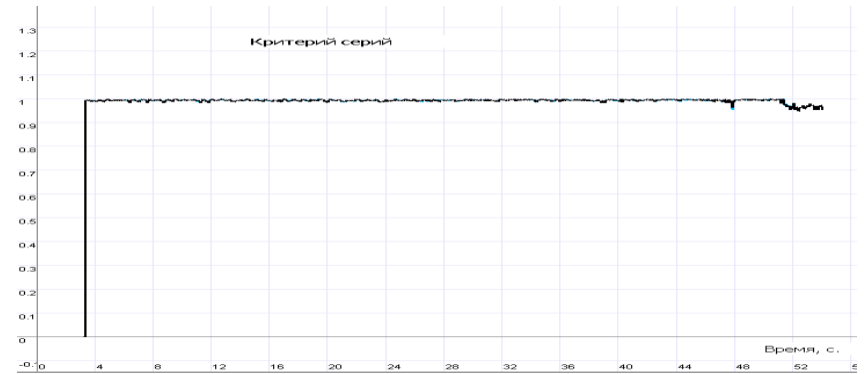


Рисунок 13 – Результаты оценки параметров сервопривода





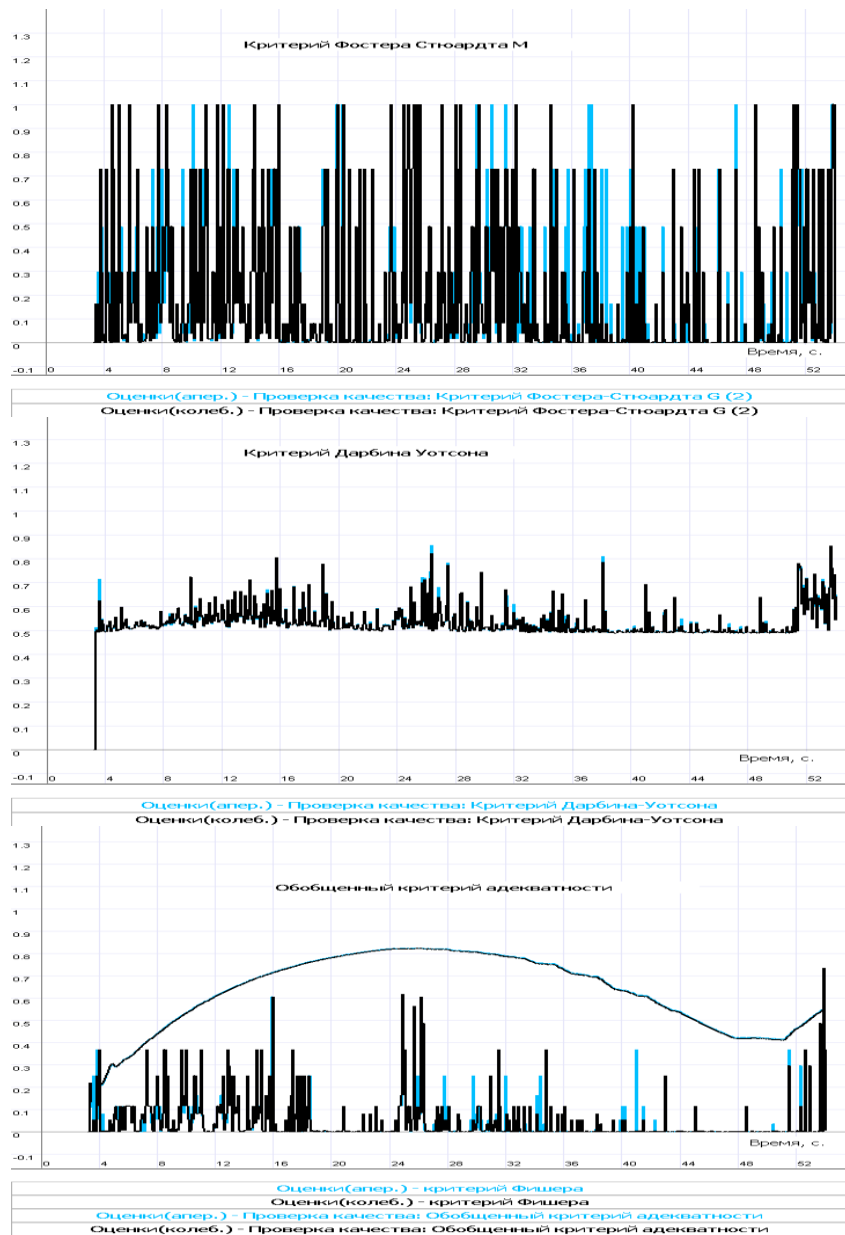
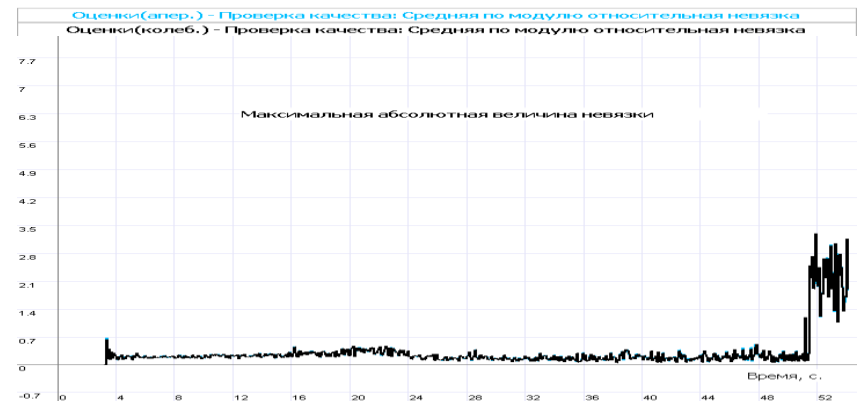
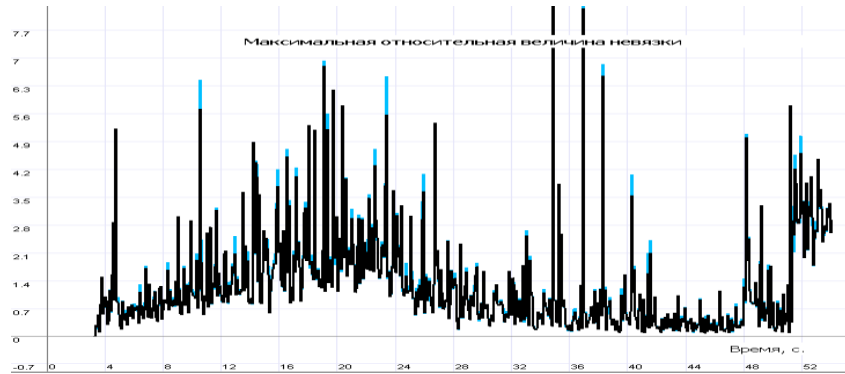


Рисунок 14 – Оценка адекватности моделей

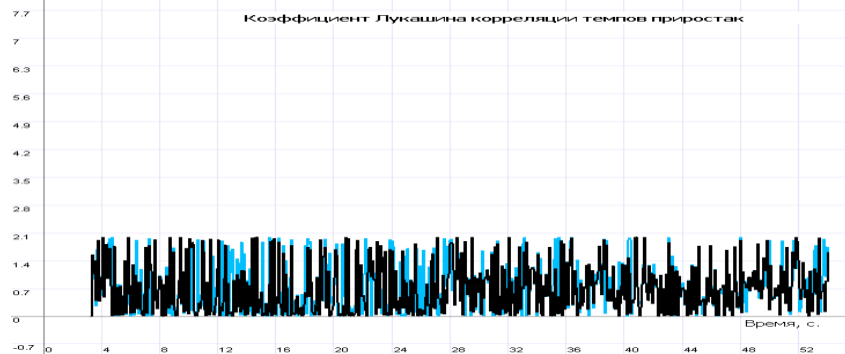




Оценки(апер.) - Проверка качества: Максимальная относительная невязка
Оценки(колеб.) - Проверка качества: Максимальная относительная невязка



Оценки(апер.) - Проверка качества: Коэффициент Лукашина корреляции приростов
Оценки(колеб.) - Проверка качества: Коэффициент Лукашина корреляции приростов



Оценки(апер.) - Проверка качества: Коэффициент Лукашина корреляции темпов приростов
Оценки(колеб.) - Проверка качества: Коэффициент Лукашина корреляции темпов приростов

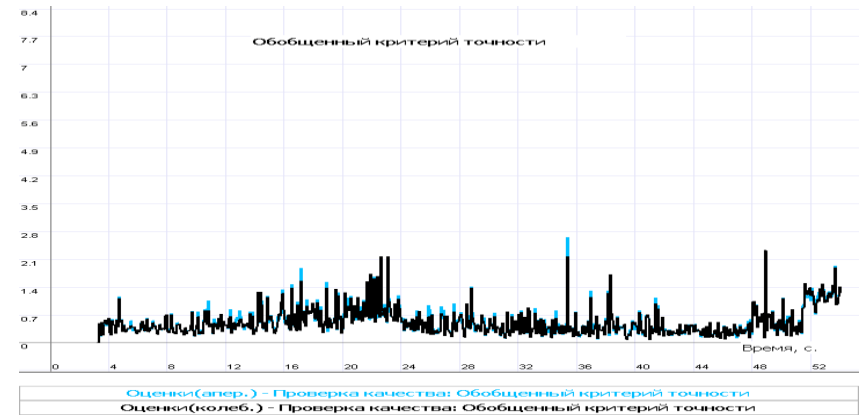


Рисунок 15 – Оценка точности моделей

Анализ полученных критериев (см. рисунок 14) для принятия решения об адекватности моделей показал, что критерии равенства нулю (о равенстве нулю математического ожидания невязки) и Хи-квадрат (о нормальности закона распределения невязки) для моделей в виде аperiodического и колебательного звена не выполняются. Не выполнение этих критериев связано с нестационарным характером изменения входного сигнала (частоты и амплитуды). В связи с этим при расчете обобщенных критериев адекватности критерии равенства нулю и Хи-квадрат были исключены. На рисунке 14 приведены значения критерия Фишера, полученные при оперативной оценке адекватности моделей. Сравнение обобщенного критерия точности (см. рисунок 15) показало, что модели в виде аperiodического и колебательного звеньев сопоставимы. Это же и подтверждают результаты оценки фазовой задержки, полученные с помощью моделей в виде аperiodического и колебательного звеньев (см. рисунок 13). На рисунке 13 кроме оценок самих параметров приводятся их оценки значимости и допустимые интервалы. Так как полученные расчетные значения критерия Стьюдента для всех оценок параметров меньше критического значения, то они являются значимыми параметрами. Полученные доверительные интервалы для оценок параметров модели в виде колебательного звена меньше, чем для аperiodического звена. Следовательно, модель в виде колебательного звена более предпочтительна, чем модель в виде аperiodического звена.

Таким образом, разработанное математическое и программное обеспечение позволяет осуществлять оперативную и полную оценку качества моделей, сравнивать и выбирать наилучшую модель при идентификации характеристик элементов системы управления по экспериментальным данным

ЛИТЕРАТУРА

- 1 Лебедев А.А., Карабанов В.А. Динамика систем управления беспилотными летательными аппаратами. М.: Машиностроение, 1965.
- 2 Понятский В.М. Использование фильтрации Калмана для оценки динамических характеристик летательного аппарата. // Вопросы атомной науки и техник. Сер. Математическое моделирование физических процессов. - 2005. - Вып. 3 - С 65 - 71
- 3 Понятский В.М. «Оценка экспериментальных баллистических характеристик летательного аппарата» // Международная научная конференция «Проблемы баллистики 2006» (19-23 июня 2006)- Санкт-Петербург. БГТУ. 2006. Сборник
- 4 Понятский В.М. Использование метода инвариантного погружения для оценки параметров электротехнических объектов // Труды четвертой Всероссийской научно-практической конференции "Системы управления электротехническими объектами". - Тула: ТулГУ, 2007
- 5 Понятский В.М. «Оценка экспериментальных характеристик летательного аппарата методом инвариантного погружения» // Первая Всероссийская научно-техническая конференция «Фундаментальные основы баллистического проектирования». 23-26 июня 2008 г.: Сборник материалов - Санкт-Петербург. БГТУ. 2008. В 2 томах. Т. 1 С.29-33
- 6 Льюнг Л. Идентификация систем. Теория для пользователя. - М.: Наука, 1991.-432с
- 7 Сейдж Э.П., Мелса Дж.Л. Идентификация систем управления. – М.: Наука, 1974.
- 8 Сейдж Э.П., Мелса Дж.Л. Теория оценивания и ее применение в связи и управлении. – М.: Связь, 1976.
- 9 Эйпховф П. Основы идентификации систем управления. - М.:Мир, 1976.
- 10 Понятский В.М., Замотаев И.В., Киселев В.Б. Идентификация нестационарного динамического объекта с использованием метода инвариантного погружения // Материалы VII Международной конференции “Идентификация систем и задачи управления”(28-31 января, 2008) – М.: ИПУ, 2008.

МЕТОДИКА АНАЛИЗА ЧАСТИЦ НА ИЗОБРАЖЕНИИ В СРЕДЕ NI LABVIEW

СПИРИДОНОВ В.В.

*Балтийский государственный технический университет «Военмех»
198005, Санкт-Петербург, 1-я Красноармейская ул., д. 1
spiridonov-vlad@yandex.ru*

Анализ частиц (*англ.* blob analysis, particle analysis) – это процесс обнаружения и обработки отдельных двумерных объектов на всем изображении или его части. Анализ частиц позволяет определить их количество, местоположение, форму, направление, площадь, периметр и другие параметры. В системах технического зрения анализ частиц имеет самое широкое применение – от поиска дефектов на кремниевых пластинах и выделения контуров на микросхемах до детектирования движущихся объектов различной формы и направления перемещения [1].

Частицу (*англ.* blob, particle) можно определить как группу связанных пикселей с приблизительно одинаковой интенсивностью [2]. Для того, чтобы максимально точно выявить такие группы пикселей необходимо конвертировать цветное изображение или черно-белое с оттенками серого в чисто черно-белое (бинарное), где каждый пиксель может быть либо черного цвета (1), либо белого (0). Это поможет отделить представляющие интерес частицы от фона и погрешностей на границах изображения, что повысит точность анализа. Кроме того, обработка бинарных изображений выполняется гораздо быстрее, чем обработка других типов.

Процедуру анализа частиц можно разделить на следующие этапы [3]:

1. Захват изображения с камеры.
2. Построение гистограммы для подбора пороговых значений.
3. Бинаризация изображения.
4. Фильтрация шумов и погрешностей на границах изображения.

5. Анализ и измерение основных параметров частиц.

Рассмотрим каждый из этих этапов более подробно.

1. *Захват изображения с камеры.*

Захват изображения может осуществляться практически с любой камеры, фотоаппарата или электронного микроскопа. Благодаря наличию в системе LabVIEW драйвера NI-IMAQ, а также поддержке библиотеки IMAQ Vision и большого количества плат расширения, можно принимать с устройства как цифровые, так и аналоговые сигналы.

2. *Построение гистограммы для подбора пороговых значений.*

Гистограмма изображения позволяет оценить распределение и

разброс интенсивности цвета пикселей на изображении. Она может быть полезна для оптимального подбора пороговых значений при бинаризации изображения и снижения погрешности этого преобразования.

Построение гистограммы в LabVIEW осуществляется с помощью компонента IMAQ Histogram. Упрощенный алгоритм с его использованием приведен на рис. 1.

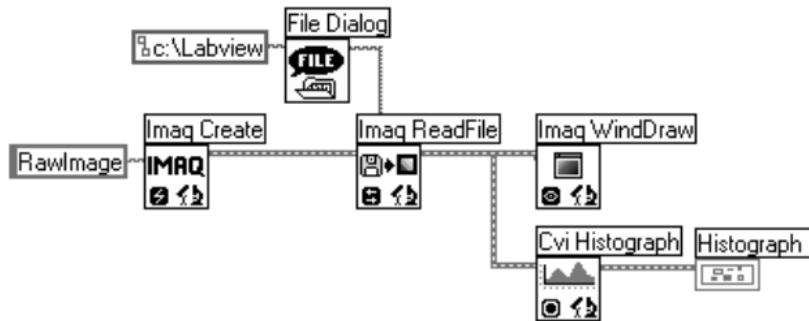


Рисунок 1 – Алгоритм построения гистограммы изображения

Исходное изображение загружается с устройства захвата изображения на жесткий диск компьютера. Компонент IMAQ Create выделяет соответствующую область оперативной памяти и передает ее адрес компоненту IMAQ ReadFile, который запрашивает у пользователя путь к каталогу с изображением с помощью FileDialog и считывает изображение в выделенную область, присваивая ему имя RawImage. Далее это изображение открывается в новом окне при помощи IMAQ WindDraw и поступает на вход IMAQ Histogram, где и выполняется построение гистограммы с последующим отображением на элементе пользовательского интерфейса Histogram.

На рис. 2 приведен внешний вид программы обработки изображений с загруженным изображением фотошаблона (256 цветов) и построенной на основе вышеописанного алгоритма гистограммой.

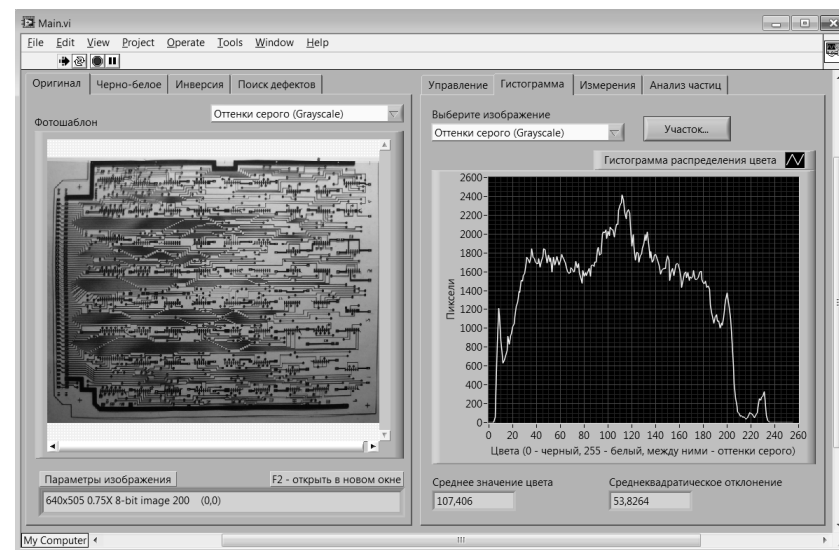


Рисунок 2 – Исходное изображение фотошаблона и его гистограмма

Как видно из гистограммы, наибольшее количество пикселей имеют интенсивность между цветами 100 и 120, а максимальное значение интенсивности цвета составляет примерно 238. Соответственно, в качестве порога для белого цвета лучше всего взять значений между 100 и 120, а верхний порог для черного ограничить на уровне 238. Это обеспечит наибольшую точность при бинаризации изображения.

3. Бинаризация изображения.

Бинаризация изображения позволяет значительно упростить и ускорить его обработку, а также отфильтровать лишние частицы, относящиеся к фону или границе изображения.

Бинаризация изображения в LabVIEW осуществляется с помощью компонента IMAQ Threshold. Упрощенный алгоритм с его использованием приведен на рис. 3.

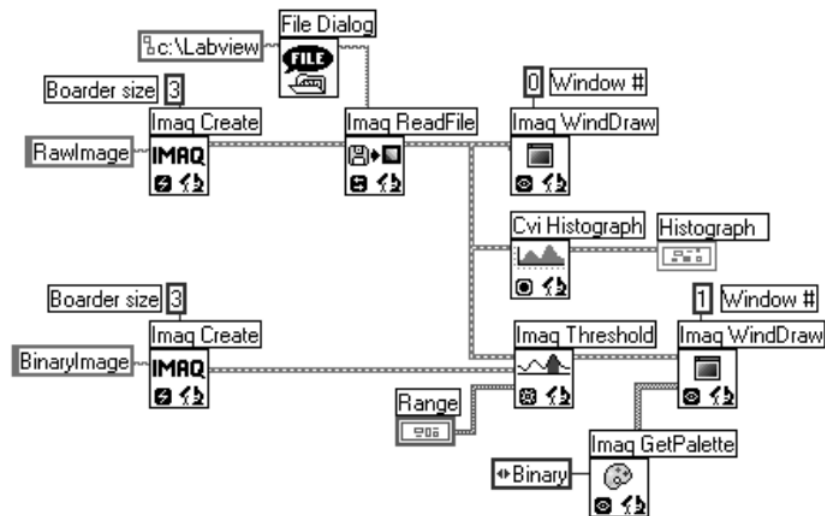


Рисунок 3 – Алгоритм бинаризации изображения

По сравнению с алгоритмом построения гистограммы, здесь были использованы некоторые дополнительные компоненты. Второй (нижний) компонент IMAQ Create выделяет объем оперативной памяти, необходимый для построения бинарного изображения, присваивает изображению имя BinaryImage и подает его адрес на средний вход (Destination image) компонента бинаризации IMAQ Threshold (на верхний вход (Source image) подается исходное 256-цветное изображение, полученное в пункте 2, на нижний вход (Range) – пороговые значения диапазонов белого и черного цветов, также полученные в пункте 2 на основе показаний гистограммы). На выходе IMAQ Threshold получается бинарное изображение с соответствующими характеристиками, которое выводится в окне IMAQ WindowDraw с соответствующей бинарной палитрой, полученной компонентом IMAQ GetPallette.

На рис. 4 представлено бинарное изображение фотошаблона, полученное в результате работы алгоритма.

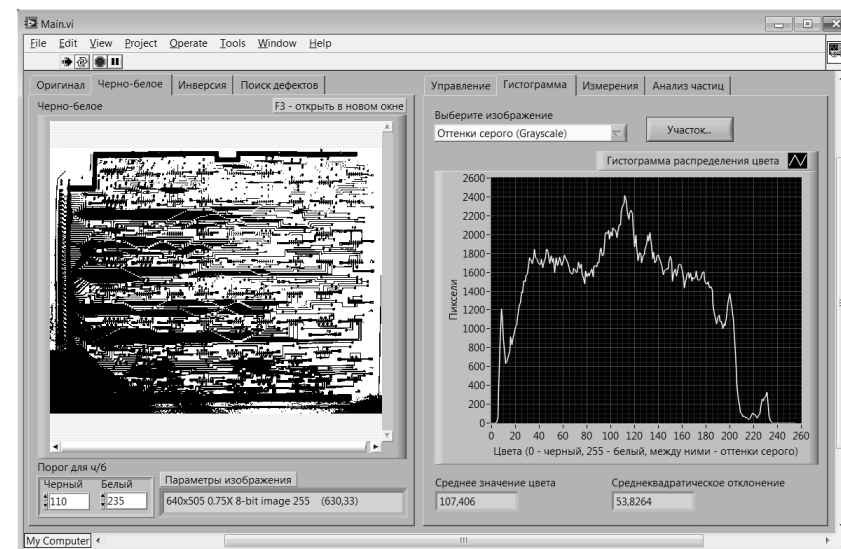


Рисунок 4 – Бинарное изображение фотошаблона, построенное на основе гистограммы

4. Фильтрация шумов и погрешностей на границах изображения.

Данный этап необходим для того, чтобы исключить из рассмотрения частицы, которые относятся к фону или границам изображения и, соответственно, не представляют интереса с точки зрения анализа самого объекта.

Для реализации этого алгоритма воспользуемся двумя компонентами системы LabVIEW – IMAQ RemoveParticle и IMAQ Reject Border. Первый компонент удаляет из изображения все частицы меньше определенного размера, а второй – удаляет частицы на границе изображения.

Фрагмент программного кода фильтрации нежелательных частиц приведен на рис. 5.

Бинарное изображение последовательно подается сначала на вход IMAQ RemoveParticle, затем на вход IMAQ RejectBorder и, наконец, выводится в отдельном окне компонентом IMAQ WindDraw.



Рисунок 5 – Фрагмент алгоритма фильтрации шумов на изображении

5. Анализ и измерение основных параметров частиц.

После выполнения описанных выше алгоритмов можно приступать непосредственно к анализу частиц на изображении. Система LabVIEW предлагает для этой задачи два компонента – IMAQ Particle Analysis (рис. 6) и IMAQ Particle Analysis Report (рис. 7). Первый из них служит для упрощенного анализа с расчетом только основных параметров частиц – количества и линейных размеров. Компонент IMAQ Particle Analysis Report значительно мощнее и позволяет вычислять те же параметры, что и компонент IMAQ Particle Analysis, а также количество разрывов (просветов) в частицах, периметр, центр масс, момент инерции и многие другие.

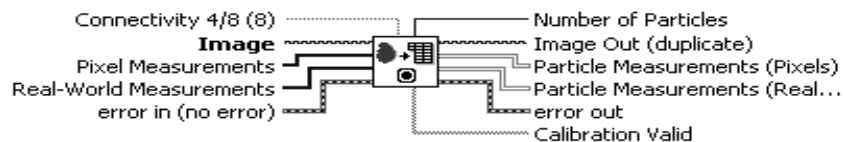


Рисунок 6 – Компонент IMAQ Particle Analysis

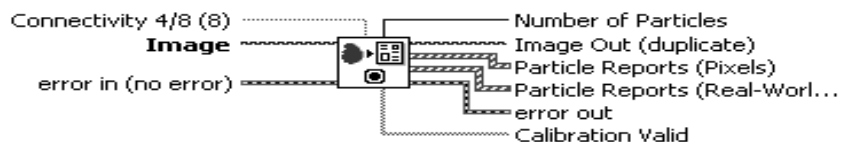


Рисунок 7 – Компонент IMAQ Particle Analysis Report

Перейдем на вкладку «Анализ частиц», выберем пункт «Анализ черно-белого изображения...», выделим какой-либо участок на бинарном изображении, и программа выведет в табличном виде количество и основные параметры обнаруженных в указанной области частиц. Результаты представлены на рис. 8 и 9.

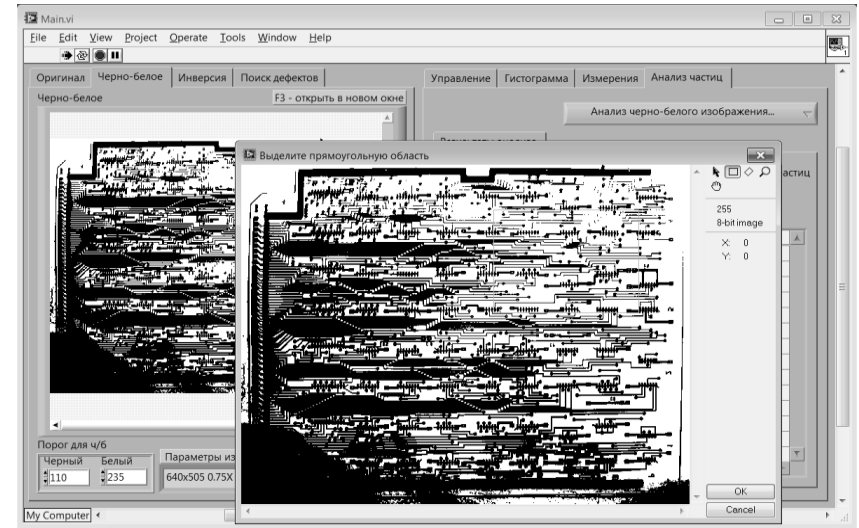


Рисунок 8 – Выделение на бинарном изображении области для анализа

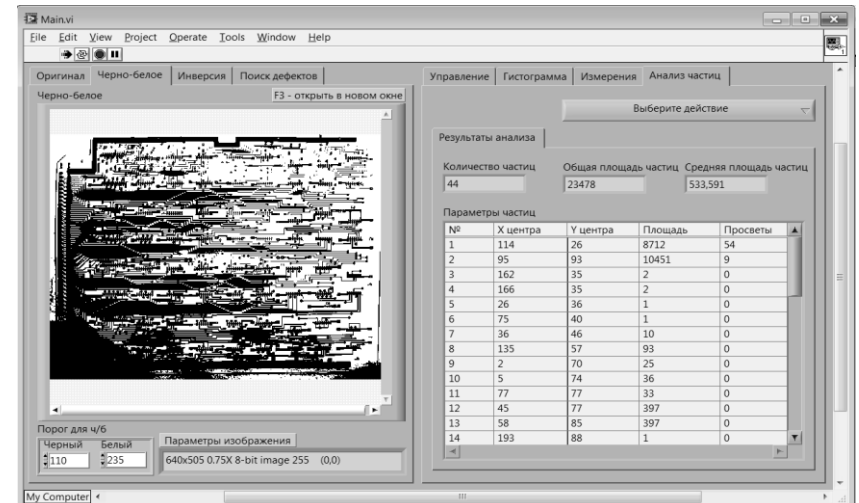


Рисунок 9 – Таблица результатов анализа частиц на выделенной области

Таким образом, можно считать, что среда графического програм-

мирования LabVIEW в сочетании с библиотекой IMAQ Vision позволяют решить задачу анализа частиц на изображении. Среда LabVIEW содержит удобные средства построения интерфейса и позволяет наглядно отображать алгоритм работы благодаря тому, что программный код представляется в графическом виде, а не в текстовом, как в других средах разработки. Библиотека IMAQ Vision создана специально для разработки систем технического зрения и значительно облегчает программирование связанных с ними алгоритмов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Писаревский А. Н., Чернявский А. Ф., Афанасьев Г. К. и др. Системы технического зрения. - М.: Машиностроение, 1988.
2. Hanks John. Counting Particles or Cells Using IMAQ Vision. - National Instruments, 1997.
3. Визильтер Ю. В., Желтов С. Ю., Князь В. А., Ходарев А. Н., Моржин А. В. Обработка и анализ цифровых изображений с примерами на LabVIEW IMAQ Vision. – М.: ДМК, 2008.

СОЗДАНИЕ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ИСПЫТАТЕЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ НА БАЗЕ РАЗРЫВНОЙ МАШИНЫ.

СУЛАБЕРИДЗЕ В.Ш. ЕФРЕМОВ Н.Ю.

*Балтийский государственный технический университет
198005, Санкт-Петербург, 1-я Красноармейская ул., д. 1
т. (812) 259-11-56, E-mail: sula@bstu.spb.su*

Оборудование для испытаний – это, как правило, сложное техническое устройство, совмещающее функции задания и контроля условий и параметров испытаний, а также регистрации, хранения, передачи и обработки выходных параметров или характеристик объекта испытаний.

Оборудование для механических испытаний, к каковому относится и разрывная машина, обычно надежно и долговечно и чаще всего устаревает морально, а не физически. Наиболее быстро «устаревающей» его частью оказываются средства контроля условий и параметров испытаний. Именно поэтому эффективным средством обновления такого оборудования является его автоматизация.

Именно такой подход и был взят за основу при решении задачи адаптации испытательной разрывной машины (рис. 1) к современным требованиям. Модернизируемое таким путем оборудование должно обеспечить достижение следующей цели: использование в учебном процессе с учетом актуальных тенденций внедрения информационных технологий при проведении испытаний паяных соединений на растяжение и срез.



Рисунок 1 – Разрывная машина завода VEB (Германия)

Рассматриваемая разрывная машина немецкого производства аналогична отечественному оборудованию, соответствующему коду ОКП 42 7111, с развивает максимальное усилие 2,5 кН и предназначена для проведения механических испытаний материалов (растяжение и разрыв образцов). Привод машины электромеханический, передача нагрузки на вертикальную ось осуществляется посредством червячной передачи. На передней части машины расположена измерительная шкала, проградуированная в килограмм-силах (кгс). Усилие, прикладываемое к образцу, передается на маятниковый силоизмеритель и отсчитывается по шкале. [1]

Выбор в качестве потенциального объекта испытаний паяных соединений неслучаен. Пайка является основным видом соединений, применяемых в электронных устройствах. Поэтому в целях оценки и обеспечения надежности электронных устройств следует учитывать и уровень надежности паяных соединений. Данные, приведенные в [2], свидетельствуют о том, что надежность ручной пайки совпадает с надежностью самого ненадежного из электронных компонентов – проволочных резисторов (интенсивность отказов составляет $0,5 \times 10^{-6}$ 1/ч). Анализ типов отказов указывает на то, что основной группой параметров соединений, обеспечивающих их надежность, являются прочностные параметры. Исследования в этой области имеют давнюю историю, накопленный опыт обобщен в государственном стандарте ГОСТ 28830-90 «Соединения паяные. Методы испытаний на растяжение и длительную прочность». Несмотря на кажущуюся простоту проблемы, выявление и оценка роли различных групп внутренних и внешних факторов на прочность паяных соединений сопряжено со многими трудностями. В том числе с малой изученностью отдельных аспектов пайки. Для решения проблемы прочности необходимо учитывать не только свойства паяемых и присадочных материалов, но и весь комплекс физико-химических и конструктивно-технологических факторов, отвечающих за формирование паяных соединений: естественное и искусственное старение припоев, напряженное состояние под нагрузкой, использование эффективного флюса, обеспечение оптимальных технологических зазоров, выполнение установленных режимов пайки [3].

Упомянутый выше государственный стандарт ГОСТ 28830-90 включает в себя требования, полностью охватывающие испытания паяных соединений на растяжение и срез. Он устанавливает характеристики паяных соединений, определяемых по результатам испытаний в соответствии с приводимой методикой. Требования к условиям испытаний включают помимо указаний по использованию материалов и режимам пайки также применение стандартных образцов пяти типов. Для испытаний на срез можно применять образцы I, IV и V, на растяжение - II и III, на длительную прочность – образцы всех типов. С учетом возможностей машины, возможно проведение испытаний соединений только на срез, на образцах

типа IV [4].

Разрывная машина помимо механизмов создания растягивающих или сжимающих усилий содержит в своем составе средства отображения создаваемого усилия и деформации образца. Наиболее устаревшим узлом машины как раз и является ее измерительный блок. Оборудование с маятниковым силоизмерителем давно снято с производства, ему на смену пришли торсионные и электрические блоки измерения нагрузки. Простой и надежный механизм силонагружения вполне пригоден для реализации поставленных целей. Поэтому модернизация разрывной машины будет заключаться в создании принципиально новой измерительной схемы, отвечающей заявленным выше требованиям.

Правильность выбранного подхода к модернизации машины подтверждает тот факт, что в недавнем времени отечественными специалистами была разработана серия универсальных автоматизированных систем ASTM – Digital, предназначенная для модернизации отечественных испытательных машин. Такие системы позволяют производить измерения нагрузки, а также перемещения активного захвата и проводить обработку результатов измерений на ПК с построением диаграммы нагружения.

Автоматизация разрывной машины путем создания локальной информационно-измерительной системы, совместимой с ПК, позволит преодолеть существующие ограничения и успешно использовать оборудование в учебном процессе для проведения механических испытаний. В обобщенном виде такая система должна состоять из первичных преобразователей (датчиков), которые через согласующие устройства подключаются непосредственно к ПК, на котором установлено специальное программное обеспечение (ПО), позволяющее производить регистрацию и обработку преобразованной измерительной информации.

Таким образом, для автоматизации измерений на разрывной машине необходимо осуществить:

1. Подбор датчиков перемещения и силы.
2. Выбор блоков сопряжения, обеспечивающих преобразование аналогового сигнала датчика в цифровую форму и совместимость с ПК.
3. Выбор или разработку специального ПО.

Современные первичные преобразователи силы и перемещения подразделяются на несколько подгрупп, определяемых используемым физическим эффектом и/или областью применения. В настоящей работе, с учетом совокупности требований и обстоятельств, выбор был сделан в пользу следующих устройств:

- Инкрементного преобразователя перемещений со штоком типа ЛИР (ЛИР-14);
- S-образного тензодатчика силы МЕРАДАТ К16-А.



Рисунок 2 – Датчик перемещения ЛИР-14

Датчики типа ЛИР (рис. 1) относятся к классу оптоэлектронных растровых преобразователей. В основу работы преобразователей перемещения положен метод оптоэлектронного сканирования штриховых растров. При перемещении штока, жестко связанного с растровой шкалой, происходит модуляция проходящих через штрихи шкалы потоков излучения, воспринимаемые соответствующими фотоприемниками. Используемый метод и технологические возможности нанесения штрихов шкалы обеспечивает абсолютную погрешность измерений примерно 3 мкм для максимальной величины перемещения 20 см. В верхней части корпуса устройства расположены два отверстия, обеспечивающие жесткую установку датчика. Выходной сигнал датчика передается непосредственно на ПК через интерфейс USB, поэтому дополнительные средства сопряжения не нужны. Также в базовой комплектации преобразователя есть ПО, позволяющее производить обработку измерительной информации.

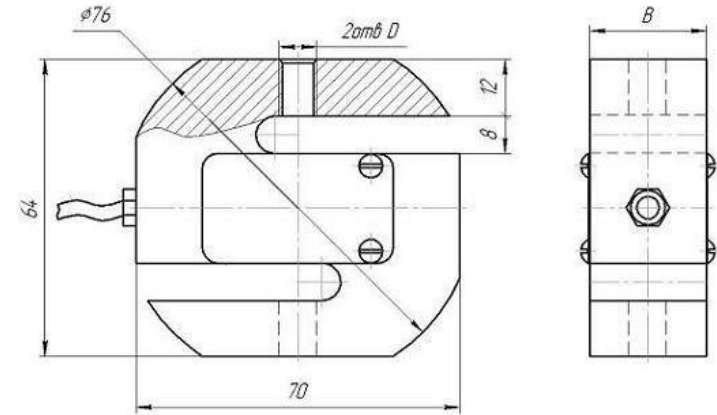


Рисунок 3 – Чертеж датчика МЕРАДАТ К16-А

Принцип действия S-образных датчиков силы (рис. 2) основан на преобразовании силы растяжения/сжатия вдоль оси симметрии датчика в пропорциональный электрический сигнал (выходное напряжение). Датчик встраивается в ту или иную систему посредством двух соосных резьбовых отверстий, а чувствительная часть, включающая тензорезисторы, соединенные в мостовую схему, находится под крышкой, расположенной в середине датчика. С диагонали моста и снимается выходной сигнал преобразователя.

В табл. 1 приведены основные характеристики выбранных датчиков

Таблица 1.

Основные характеристики преобразователей

Технические характеристики	ЛИР-14	МЕРАДАТ К16-А
Размеры (ДхШхВ), мм	127х45х19 (без штока)	64х70х20
Диапазон измерения	0-20 мм	0-250 кгс
Предельно допустимая погрешность ¹	2-3 мкм	0,07-0,21 кгс

¹Приведены граничные значения погрешностей, соответствующие минимальному и максимальному значению измеряемой величины.

Для замыкания автоматизированной цепочки измерения усилия были использованы имеющиеся в наличии технические и программные средства. Это универсальный модуль сопряжения (УМС1), разработанный ФГУП «ГНЦ РФ НИИАР», снабженный специальным ПО.

По архитектуре построения, способу функционирования и конструктивному исполнению УМС1 напоминает модули популярной серии ADAM-4000 фирмы Advantech. Отличия заключаются в наличии в модуле УМС1 универсальной входной аналоговой части, в дополнительных измерительных диапазонах, в возможности задания аналоговым каналам неидентичных коэффициентов усиления, в значительно более низкой погрешности измерений встроенного АЦП и в возможности оперативного изменения программного обеспечения (ПО) контроллера. Универсальность данного средства также обеспечивается возможностью подключения различных типов датчиков: термоэлектропреобразователи; ионизационная камера; детектор плотности потока нейтронов; термонейтронный детектор, термосопротивление, тензопреобразователь и др. Настройка на соответствующий тип датчика производится изменением положения переключателей (джамперов) в аналоговой части и получением модулем соответствующей команды выбора типа датчика (детектора) по интерфейсу RS-485 от ПК. Одно из положений переключателей предназначено для измерения электродвижущей силы (ЭДС), что дает возможность совместного использования УМС1 и датчика силы. Для подключения модуля к ПК необходимо только дополнительное устройство преобразования сигналов интерфейсов RS-232 и RS-485.

Специальное ПО обеспечивает корректную работу модуля УМС1, управление им, а также обработку, сохранение и отображение измерительной информации. Управление модулем осуществляется путем передачи через последовательный порт символьных команд, представляемых в формате ASCII, и приема ответных сообщений от модулей [5].

Стандарт ГОСТ 28830-90 в числе прочих содержит требования, которые могут быть применены к элементам создаваемой измерительной системы. Они содержатся в стандарте ГОСТ 28840-90, ссылка на который установлена в п. 2.8.2. Данный стандарт устанавливает пределы допускаемых погрешностей измерения нагрузки и удлинения (деформации). Для нагрузки установлена величина относительной погрешности $\pm 1\%$ (п. 2.3.), для удлинения – предельная приведенная погрешность $\pm 1\%$ от верхнего предела диапазона измерителя (п. 2.4). С учетом характеристик датчиков, приведенных в табл. 1, данные средства соответствуют требованиям к точности измерений и пригодны для использования в рамках поставленной цели.

Ориентируясь на присоединительные размеры установочных элементов датчиков и узлов крепления захватов машины, а также стандарт-

ных образцов, были спроектированы переходные детали, обеспечивающие установку датчиков на машину. На рис. 3 приведена итоговая модель рассматриваемого узла машины после установки всех новых элементов.

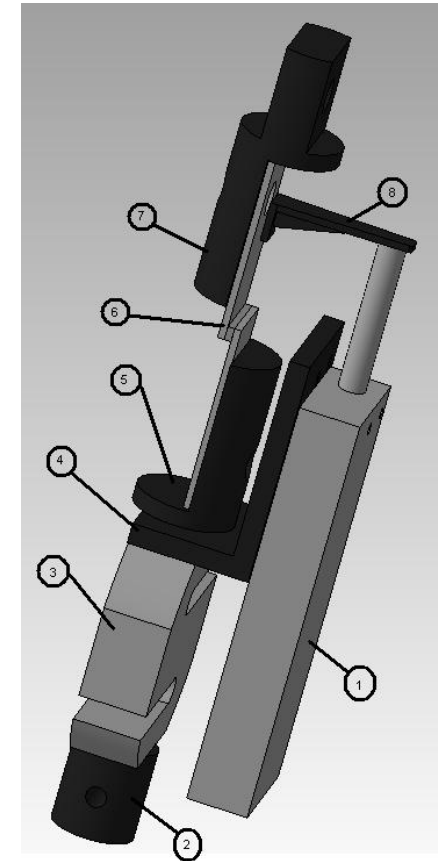


Рисунок 4 – 3D-модель сборки узла машины с датчиками и испытываемым образцом:

1 – датчик ЛИР-14; 2, 4, 5, 7 – переходные детали; 3 – датчик МЕРАДАТ К16-А; 6 - образец типа IV по ГОСТ 28830-90 для испытаний на срез; 8 – упор для датчика ЛИР.

Описанные средства позволяют модернизировать разрывную машину и достигнуть соответствия современным требованиям к подобным техническим устройствам.

ЛИТЕРАТУРА

- 1) ГОСТ 28840-90. Машины для испытаний материалов на растяжение, сжатие и изгиб. Общие технические требования
- 2) Федоров В.К., Сергеев Н.П., Кондрашин А.А. Контроль и испытания в проектировании и производстве РЭС. –М.: Техносфера, 2005 – 504 с.
- 3) Парфенов А.Н. Введение в теорию прочности паяных соединений // Технологии в электронной промышленности. 2008. №2. с. 46-52.
- 4) ГОСТ 28830-90. Соединения паяные. Методы испытаний на растяжение и длительную прочность
- 5) Корчков Ю. Н., Мокеичев А. М., Сулаберидзе В. Ш., Троицкий С. Б. Универсальный модуль сопряжения датчиков внутриреакторных измерений с компьютером // Датчики и Системы. 2003. №7. с. 38-41.

ОТКАЗЫ СВЧ-ГЕНЕРАТОРОВ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ КОЛЕБАНИЙ НА ОСНОВЕ ДИОДОВ ГАННА

СУЛАБЕРИДЗЕ В.Ш., КРЫЖКО С.Л.

*Балтийский государственный технический университет
198005, Санкт-Петербург, 1-я Красноармейская ул., д. 1
т. (812) 259-11-56, E-mail: sula@bstu.spb.su*

Введение

Одним из основных узлов автомобильных радаров является генератор СВЧ электромагнитных волн. Часто применяется генератор на основе диода Ганна. Сам диод представляет собой полупроводниковый кристалл арсенида галлия. Генерацию СВЧ-колебаний в однородных образцах GaAs n-типа при напряженности постоянного электрического поля выше порогового значения впервые наблюдал Дж. Ганн в 1963 г. (поэтому такие приборы называют диодами Ганна). В отечественной литературе их называют также приборами с объемной неустойчивостью или с междолинным переносом электронов, поскольку активные свойства диодов обусловлены переходом электронов из «центральной» энергетической долины в «боковую», где они характеризуются большой эффективной массой и малой подвижностью. В иностранной литературе последнему названию соответствует термин ТЭД (Transferred Electron Device).

Традиционно диод Ганна состоит из слоя арсенида галлия толщиной от единиц до сотен микрометров с омическими контактами с обеих сторон. В этом материале в зоне проводимости имеются два минимума энергии, которым соответствуют два состояния электронов — «тяжёлые» и «лёгкие». В связи с этим с ростом напряжённости электрического поля средняя дрейфовая скорость электронов увеличивается до достижения полем некоторого критического значения, а затем уменьшается, стремясь к скорости насыщения.

Таким образом, если к диоду приложено напряжение, превышающее произведение критической напряжённости поля на толщину слоя арсенида галлия в диоде, равномерное распределение напряжённости по толщине слоя становится неустойчиво. Тогда при возникновении даже в тонкой области небольшого увеличения напряжённости поля электроны, расположенные ближе к аноду, «отступят» от этой области к нему, а электроны, расположенные у катода, будут пытаться «догнать» получившийся движущийся к аноду двойной слой зарядов. При движении напряженность поля в этом слое будет непрерывно возрастать, а вне его — снижаться, пока не достигнет равновесного значения. Такой движущийся двойной слой зарядов с высокой напряжённостью электрического поля внутри получил название домена сильного поля, а напряжение, при котором он воз-

никает — порогового.

В момент зарождения домена ток в диоде максимален. По мере формирования домена он уменьшается и достигает своего минимума по окончании формирования. Достигая анода, домен разрушается, и ток снова возрастает. Но едва он достигнет максимума, у катода формируется новый домен. Это хорошо видно на вольт-амперной характеристике рис. 1. Частота, с которой этот процесс повторяется, обратно пропорциональна толщине слоя полупроводника и называется пролетной частотой.

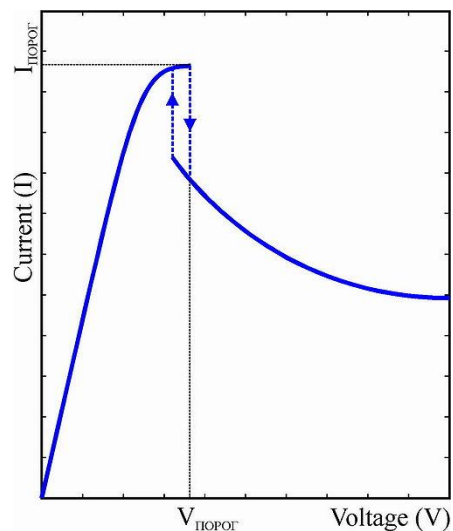


Рисунок 1 – Вольт-амперная характеристика диода Ганна

При помещении диода Ганна в резонатор возможны другие режимы генерации, при которых частота колебаний может быть как ниже, так и выше пролетной частоты.

СВЧ генератор на основе диода Ганна состоит из алюминиевого корпуса, медного винта с припаянным к нему диодом из арсенида галлия, контактного согласующего штыря-фильтра с диэлектрической изоляцией, двух прижимных винтов, диэлектрического штыря-регулятора, пружины, колпачка штыря-фильтра, конденсатора, крепления конденсатора (рис. 2). С передней стороны корпуса расположена резонансная камера, представляющая собой глухое вытянутое отверстие. Длина камеры равна длине волны: для рассматриваемого генератора, работающего на частоте 25,15 ГГц, 12 мм. Через резонансную камеру просверлено сквозное отверстие. Сама камера делит это отверстие на два. В них нарезана резьба. В нижнее

отверстие ввинчивается медный винт, к которому припаян диод Ганна. Он ввинчивается до тех пор, пока диод не окажется примерно посередине резонансной камеры.

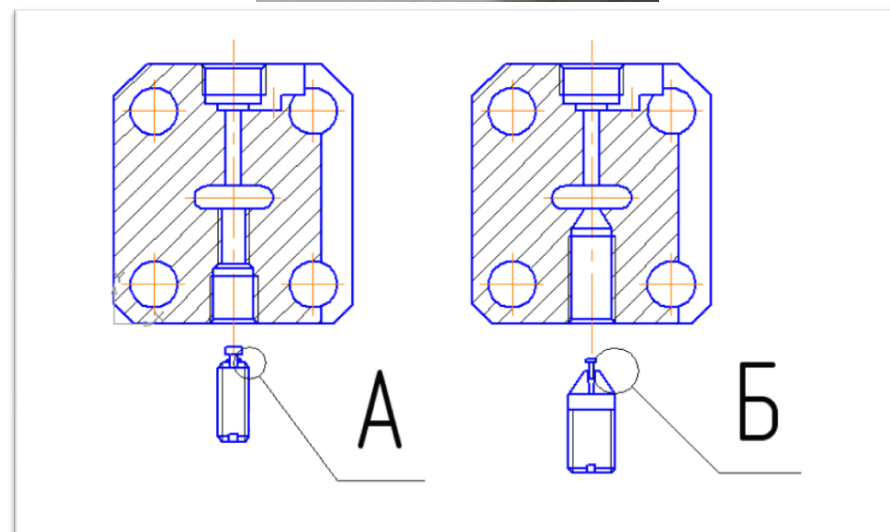
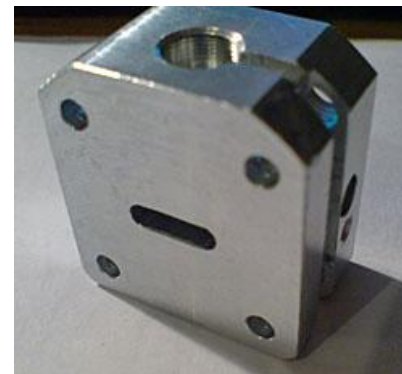


Рисунок 2 – Общий вид и разрез корпуса СВЧ-генератора

В дальнейшем уже при собранном полностью генераторе подстраивается положение диода таким образом, чтобы выходное сопротивление (импеданс) было максимальным. В противоположное отверстие

вставляется штырь-фильтр, изолированный диэлектрической плёнкой от замыкания всего контура на корпус. Штырь обладает определённой реактивностью, что позволяет сформировать нужный внутренний колебательный контур вместе с диодом Ганна. С одной стороны штыря припаян провод питания. Вместе с проводом вставленный в отверстие штырь сверху прижимается пружиной и фиксируется диэлектрической вставкой и медным винтом. Такая подпружиненная конструкция необходима для компенсации терморасширения деталей во время работы генератора (КПД диода Ганна всего около 5%, остальная энергия идет на нагрев). Компенсация происходит за счёт возможности перемещения штыря-фильтра по направляющему отверстию. На боковой грани корпуса расположено еще одно отверстие, которое выходит в резонансную камеру. В это отверстие ввинчивается винт с диэлектрическим цилиндром, который вводится в камеру для изменения её размеров с целью подстройки рабочей частоты устройства.

Анализ видов и причин отказов

Вышеописанная конструкция применяется без существенных изменений уже около 30 лет! За это время накопилось достаточно информации по отказам этой системы, связанным в первую очередь с конструктивным исполнением. В табл.1 представлены виды отказов и средний процент вышедших из строя генераторов по причине каждого вида отказа.

Таблица 1.

Анализ отказов СВЧ-генераторов на основе диодов Ганна

Вид и причина отказа	Возможные причины отказа (описание отказа)	Процент отказов
Обрыв в цепи диода вследствие заклинивания штыря-фильтра	<ul style="list-style-type: none"> • возникает при остывании генератора после длительной работы, если при изготовлении корпуса не были соблюдены требуемые параметры отверстия штыря-фильтра; • неоднородность диэлектрического слоя штыря-фильтра; • при случайном перекосе пружины из-за механического воздействия; • из-за отрыва провода питания, припаянного к штырю-фильтру; • внешние механические повреждения; • выгорание активной области диода вследствие перегрева. 	49%
Короткое замыкание в цепи	В этой ситуации происходит разрушение корпуса диода вследствие термического рас-	25%

диода вследствие заклинивания штыря-фильтра	ширения во время работы и одновременном заклинивании штыря-фильтра в исходном положении. В этой ситуации при повторном включении генератора вследствие терморасширения потерявший возможность перемещаться штырь-фильтр раздавливает диод Ганна. Заклинивание происходит по вышеописанным причинам.	
Обрыв вследствие нарушения крепления диода к винту	Может возникнуть из-за некачественной пайки диода к винту или вследствие механических повреждений при ударе или тряске	5%
Скачок частоты (срыв генерации)	<ul style="list-style-type: none"> • Возникает из-за неправильного контакта по резьбе винта с припаянным к нему диодом и корпуса генератора. В СВЧ технике стараются вообще избегать резьбовых контактов, так как сама резьба является реактивной, что при определённых внешних условиях может привести к перестройке внутреннего контура генератора на другую частоту или даже возникнуть срыв генерации; • Облом диэлектрического штыря в резонансной камере по причине внешних механических воздействий; • Попадание в резонансную камеру частичек заусенцев при некачественном производственном контроле. 	21%

Мероприятия по уменьшению количества преждевременных отказов

В результате анализа отказов был разработан ряд конструктивных изменений:

1. Провод питания с жилой из одного провода, припаянный к штырю-фильтру, был заменен более гибким и меньшего диаметра одножильным многопроволочным, что уменьшило в несколько раз вероятность обрыва провода вследствие усталостного износа из-за постоянного перемещения штыря-фильтра при терморасширении. Эта мера привела к снижению числа отказов на 10%

2. Было улучшено качество диэлектрического покрытия штыря-фильтра, за счет замены материала диэлектрика на материал с более высокой диэлектрической проницаемостью. За счёт этого удалось умень-

шить толщину покрытия и её однородность, что снижает вероятность заклинивания;

3. Разработана конструкция винта-цанги (рис. 2, Б) вместо винта с припаянным к нему диодом Ганна (рис. 2, А), что при небольших конструктивных изменениях позволит избавиться от контакта по резьбе и следующей из этого паразитной реактивности, которая приводит к срыву генерации или скачку частоты. Такой винт имеет конусную головку с фрезерованными углублениями крестом. Перед ввинчиванием на головку наносится термопаста (для более качественного отвода тепла от диода). Во фрезерованное углубление вставляется нижний контакт диода, и затем винт-цанга ввинчивается в отверстие, тем самым прижимая жестко контакт диода. В этом случае возникает хороший точечный контакт без участия резьбы.

Кроме вышперечисленных конструктивных мер устранения причин отказов необходим четкий контроль при выполнении технологических операций создания корпуса генератора. Желательно выполнение всех переходов за одНУ установку на станке с ЧПУ с револьверной головкой. В технологический процесс нужно добавить переход чистового развертывания отверстия для штыря-фильтра и очистки всех поверхностей от заусенцев. Введение дополнительных операций развертывания отверстий и очистки поверхностей от заусенцев позволило уменьшить число преждевременных отказов на 28%.

Таким образом, анализ видов и причин отказов и принятые меры по их устранению привели к существенному повышению надежности генераторов.

Фундаментальные основы баллистического проектирования
2010

Секция 7

Новые компьютерные технологии
и средства компьютерного моделирования
при проектировании



РЕЗУЛЬТАТЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ И ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТЕПЛОЗАЩИТЫ И ОГНЕЗАЩИТЫ КОНСТРУКЦИЙ И ИЗДЕЛИЙ

ГАРАЩЕНКО А.Н., РУДЗИНСКИЙ В.П.
ОАО «ЦНИИ специального машиностроения»
141350, Хотьково, Московской обл., ул. Заводская
т./факс (495)786-22-68, E-mail a.n.gar@mail.ru

После разработки программных комплексов (ПК) серии «ТЕПЛОЗАЩИТА» и «ОГНЕЗАЩИТА», о чем докладывалось в 2000 г. на одной из предшествующих конференций [1], продолжались работы по практическому использованию и дальнейшему совершенствованию ПК. Разработанные программы позволяют учесть все основные физико-химические процессы, происходящие при высокотемпературном воздействии на тепло- и огнезащиту. Они сертифицированы в специализированном органе: «Независимом испытательном центре программных средств «КУРС» МГТУ им. Н.Э. Баумана. На программу «ТЕПЛОЗАЩИТА. Версия 1» и программы «ОГНЕЗАЩИТА» в 2000-2001 гг. получена серия сертификатов Росстандарта (сертификаты № РОСС.RU. СП05.С00023, РОСС.RU.СП05.С00036, РОСС.RU.СП05.С00037, РОСС.RU.СП05.С00038, РОСС.RU.СП05.С00039).

Уточнение исходного математического описания и численного алгоритма для теплозащиты при температуре газовой среды до 4000 К, проведенное с учетом положений [2], позволило разработать ПК «ТЕПЛОЗАЩИТА. Версия 2», который является логическим развитием его предыдущей версии. Его сертификация проведена в 2008 г. (сертификат № РОСС.RU.СП05.С00264). Кроме того, в 2008 г. была проведена повторная сертификация и получены новые сертификаты на программные комплексы серии «ОГНЕЗАЩИТА», поскольку на протяжении нескольких лет их практического использования не поступали замечания и не появились сомнения в их достаточно высоком научно-техническом уровне и практической значимости (сертификаты № РОСС.RU.СП05. С00261, РОСС.RU.СП05.С00262, РОСС.RU.СП05.С00263).

Перечень разработанных программных комплексов представлен в таблице. Они позволяют проводить расчеты для различных видов теплозащитных покрытий (ТЗП) и огнезащитных покрытий (ОЗП), отличающихся условиями воздействия на них высокотемпературной окружающей среды и особенностями сложного поведения покрытий в таких условиях.

Диапазон изменения параметров высокотемпературного воздействия весьма значителен: температура газовой среды может изменяться от сотен до нескольких тысяч градусов, а время теплового воздействия – от десятков секунд до нескольких часов.

Таблица

Перечень программных комплексов для расчетов тепло- и огнезащиты

Наименование программного комплекса	Обозначение ПК
ПК для расчетов нестационарных температурных полей (НТП) в конструкциях с разлагающейся и вспучивающейся теплозащитой.	ТЕПЛОЗАЩИТА. Версия 1
ПК для расчетов НТП в конструкциях с учетом поверхностного уноса ТЗП при повышенных температурах	ТЕПЛОЗАЩИТА. Версия 2
ПК для расчетов НТП в конструкциях с разлагающейся и вспучивающейся или испытывающей усадку огнезащитой	ОГНЕЗАЩИТА. Версия ВУ.1., Версия ВУ.2
ПК для расчетов НТП в конструкциях с водосодержащей огнезащитой на минеральной основе.	ОГНЕЗАЩИТА. Версия ВН.1
ПК для расчетов НТП в конструкциях со вспучивающейся огнезащитой из водосодержащих материалов на минеральной основе.	ОГНЕЗАЩИТА. Версия ВВН
ПК для расчетов двумерных НТП в конструкциях с огнезащитой из пористых или волокнистых материалов.	ОГНЕЗАЩИТА. Версия 2Т
ПК для расчетов двумерных НТП в конструкциях с огнезащитой из водосодержащих материалов на минеральной основе.	ОГНЕЗАЩИТА. Версия ВН.2Т

Численные исследования разработанных ПК показали их высокие характеристики. Например, устойчивость и сходимость результатов, получаемых с помощью ПК «ТЕПЛОЗАЩИТА. Версия 2», обеспечивается, при повышенных температурах газовой среды и интенсивном поверхностном уносе массы кокса. Устойчивость и сходимость результатов, получаемых с помощью комплексов «ОГНЕЗАЩИТА. Версия ВУ.2» обеспечивается при 100-кратном вспучивании и последующем интенсивном уменьшении толщины пенококса. Эта цель достигается также при одновременном вспучивании и испарении-влагопереносе-конденсации (ПК «ОГНЕЗАЩИТА. Версия ВВН).

Основное предназначение разработанных программ (в настоящее время и в перспективе) – проведение проектных расчетов толщин ТЗП и ОЗП, а также прогрева защищаемых ими конструкций. Следует отметить,

что для конкретных покрытий обеспечено определение их свойств, необходимых для проведения расчетов по соответствующим программам, причем наиболее важные из свойств определялись по оригинальным методикам. Для каждой из моделей и методик расчетов проводилось их апробирование, включающее экспериментальную проверку. Это подтверждало правильность математических моделей и программ расчетов, а также используемых при расчетах свойств покрытий.

Для теплозащиты из резиноподобных материалов экспериментальная проверка проводилась путем сопоставления результатов расчетов с многочисленными данными испытаний образцов ТЗП в условиях модельного газогенератора [3]. Для сопоставления использовались результаты термопарных измерений прогрева образцов типичных резиноподобных покрытий и значения глубин деструкции (δ_d), полученные при относительно низкой скорости обтекания ТЗП продуктами сгорания (менее 10 м/с), при которой отсутствуют отрывы кокса. Ход и результаты экспериментальной проверки разработанной модели продемонстрированы на примере ТЗП на основе этиленпропиленового каучука. На рис. 1, 2 представлены результаты сопоставления «расчет-эксперимент» при температуре газовой среды около 3500 К.

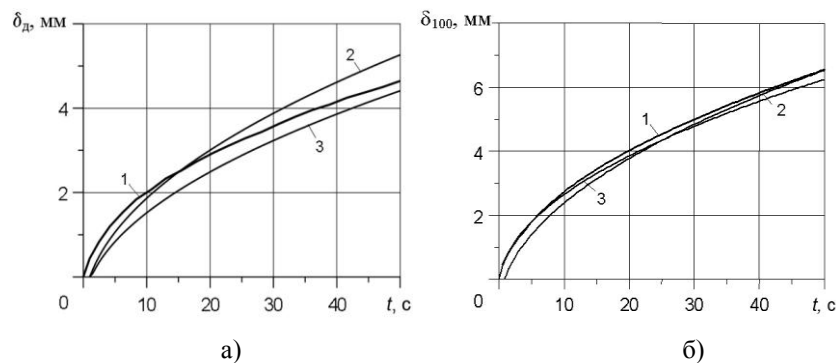


Рисунок 1 – Зависимости от времени глубины прогрева ТЗП до температуры 300°C (глубина деструкции) (а) и до 100°C (б) при скорости газового потока менее 10 м/с: 1 – расчетная кривая, 2, 3 – граничные кривые, аппроксимирующие данные конкретных экспериментов.

При экспериментальной проверке использованы также данные, полученные на модельных газогенераторах при скорости потока газов, при которой происходят отрывы кокса ТЗП. На рис. 2 представлен пример сопоставления расчетных и эмпирических зависимостей по глубинам про-

движения изотерм 100°С и 300°С (δ_d). Они получены для рассматриваемого ТЗП при температуре газовой среды около 3500 К и скорости 13,5 м/с. Удовлетворительное соответствие «расчет-эксперимент» свидетельствует о достоверности разработанной методики для теплозащиты.

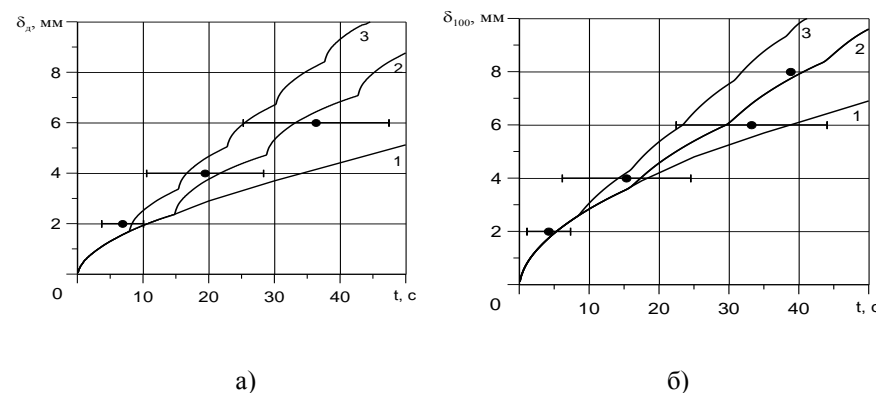


Рисунок 2 – Зависимости от времени глубины деструкции ТЗП (а) и глубины его прогрева до 100°С (б) при отсутствии (1) и наличии (2, 3) отрывов кокса различной интенсивности: • - средние значения экспериментальных данных; I - среднеквадратическое отклонение.

На рис. 2 демонстрируется также влияние прочности кокса на глубину деструкции. Показано, что в случае завышения прочности по сравнению реальными значениями отрывы кокса исключаются. Это приводит к соответствующему снижению расчетных величин δ_d и δ_{100} (кривые 1). Механический унос, если заданы реальные значения прочностных характеристик (кривые 2), а также при меньших значениях этих характеристик (кривые 3). Расчеты продемонстрировали, что зафиксированные в экспериментах значения глубины деструкции и глубины продвижения изотермы 100°С могут быть объяснены только отрывами кокса.

В результате разработки математической модели работы и программы расчетов ТЗП создан эффективный инструмент для проектных расчетов и параметрических исследований. В докладе представлены примеры параметрических расчетов применительно к тепло- и огнезащитным покрытиям.

Типичные результаты параметрических исследований, проведенных на примере рассматриваемого ТЗП на основе этиленпропиленового каучука, представлены на рис. 3, 4. Они получены для характерных условий теплового воздействия на теплозащиту (температура продуктов сгора-

ния 3500К, скорость потока 5 м/с). Проведен анализ полученных результатов, представленных в виде изменения от времени глубины деструкции.

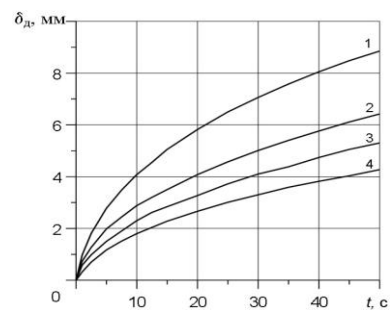


Рисунок 3 – Зависимости от времени δ_d ТЗП при величинах относительной деформации (кратности) вспучивания, равных 0 (1); 0,7 (2); 1,5 (3); 3,0 (4).

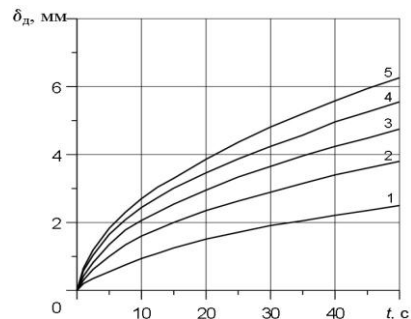


Рисунок 4 – Зависимости от времени δ_d ТЗП при величинах параметра лучистого теплопереноса Θ , равных 0 (1); $1 \cdot 10^{-11}$ (2); $2 \cdot 10^{-11}$ (3); $3 \cdot 10^{-11}$ (4); $4 \cdot 10^{-11}$; Вт/м·К⁴ (5).

Значительное влияние на прогрев теплозащиты оказывает величина вспучивания. При трехкратном вспучивании глубина деструкции уменьшается более чем в два раза, по сравнению со случаем ее отсутствия (рис. 3). Подобные результаты являются, по существу, косвенным подтверждением факта наличия или отсутствия вспучивания того или иного покрытия. В силу этого подобные расчетные данные использовались при анализе результатов экспериментальных исследований и уточнении физической модели работы ТЗП.

Существенное влияние на прогрев теплозащиты оказывает величина параметра лучистого теплопереноса в порах Θ [4, 5], входящего в зависимости для определения эффективной теплопроводности пористого поверхностного слоя. Увеличение параметра Θ от $1 \cdot 10^{-11}$ до $4 \cdot 10^{-11}$ Вт/м·К⁴ приводит к увеличению глубины деструкции приблизительно на 70% (рис. 4). Оценка влияния величины эндотермического эффекта термического разложения показала, что его увеличение от 0 до $3 \cdot 10^6$ Дж/кг уменьшает глубину деструкции ТЗП на 25-30%. В меньшей степени сказывается влияние удельной теплоемкости газообразных продуктов термического разложения (при ее увеличении с 1000 до 3000 Дж/кг·К δ_d уменьшается приблизительно на 12%).

Результаты моделирования влияния температуры продуктов сгорания на δ_d и прогрев ТЗП представлены на рис. 5-7. Они демонстрируют, насколько изменяется характер деструкции и прогрева ТЗП при изменении в значительных пределах температуры воздействия. Кроме оценки влияния данного важнейшего параметра на работу теплозащиты, эти расчеты продемонстрировали возможности проведения расчетов при уровне температуры 4000°С и выше с учетом особенностей работы теплозащиты при таких температурах, отмеченных в [2].

Важные результаты получены в ходе оценки роли механического уноса при работе ТЗП. Влияние величины прочностных характеристик кокса на глубину деструкции ТЗП и на параметры уноса (период отрывов и размер отрываемых слоев кокса) показано на рис. 2, 7. Представленные графики демонстрируют зависимость параметров уноса (периода отрывов и толщины уносимых слоев кокса) от уровня прочностных характеристик. Расчеты свидетельствуют о том, что относительно большой разброс глубин деструкции ТЗП, зафиксированный при испытаниях в модельном газогенераторе, в значительной степени объясняется механическим уносом. Анализ результатов параметрических расчетов, в частности, дает важную информацию для прогнозирования влияния рецептурных компонентов и эффектов от их использования на работоспособность покрытий. Это позволяет осуществлять осознанное и целенаправленное повышение их эффективности.

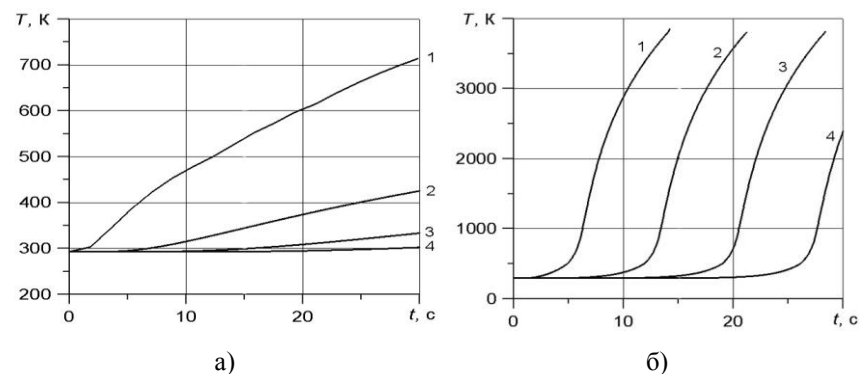
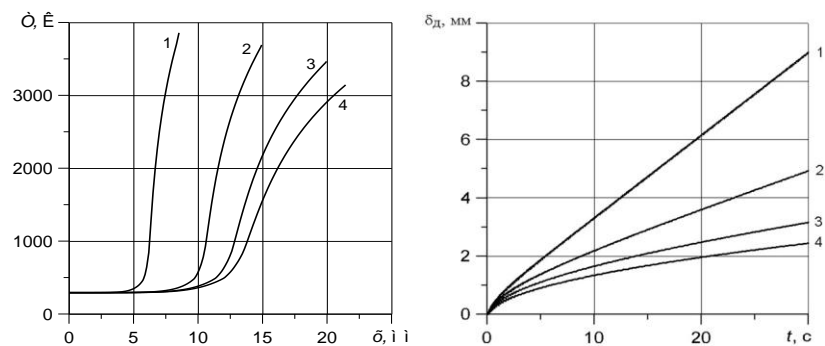


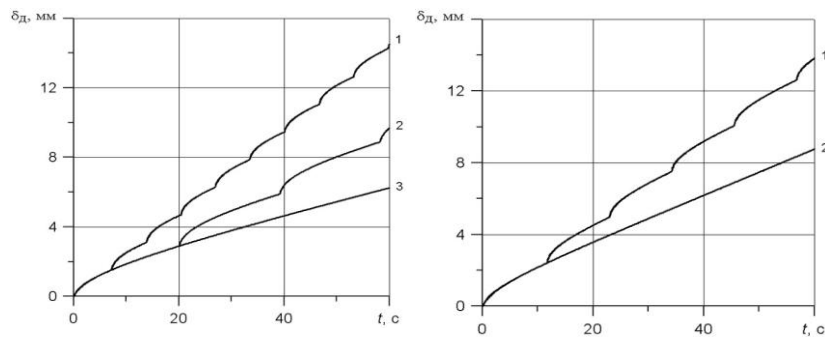
Рисунок 5 – Зависимости от времени распределения температуры по толщине теплозащиты при воздействии газовой среды с температурой 3200 К (а), 4400 К (б) в сечениях, расположенных на расстоянии от ненагреваемой поверхности: 14 мм (1); 11 мм (2); 9 мм (3); 7 мм (4).



а)

б)

Рисунок 6 – Изменение температуры по толщине ТЗП в момент времени 30 с (а) и глубины деструкции от времени (б) при температуре газовой среды 4400 К (1); 4000 (2); 3600 (3); 3200 К (4).



а)

б)

Рисунок 7 – Изменение от времени глубины деструкции ТЗП при наличии и отсутствии отрывов слоев кокса при температуре газовой среды 3800 К (а) и 4000 К (б): 1 - прочность кокса 50 H/m^2 ; 2 - 70; 3 - 90 H/m^2 .

Подобные результаты получены также при исследованиях огнезащиты. Экспериментальная проверка методик и программ расчетов для различных видов огнезащиты проводилась путем сопоставления результатов расчетов и стандартных испытаний конструкций с типичными ОЗП в огневых печах. Рассматривались средства огнезащиты, которые нашли значительное применение на практике и для которых имеются надежные результаты таких испытаний. Опубликованные результаты экспериментальной проверки свидетельствуют о достоверности разработанных методик и программ расчетов, а также комплекса свойств ОЗП, необходимых для проведения расчетов.

Как и в случае с теплозащитой, удалось создать эффективный инструмент для проектных расчетов и параметрических исследований различных моделей огнезащиты. Методики проектных расчетов оказались наиболее востребованы для строительной отрасли. С их помощью выпущены десятки проектов огнезащиты конструкций для различных объектов и изделий. Расчеты проводились и для изделий специальной техники (корабельные конструкции, элементы ракетных комплексов, контейнеры для хранения и транспортировки опасных грузов).

В качестве примера параметрических исследований приведены результаты расчетов прогрева конструкций, защищенных вспучивающимся покрытием типа ПРОТЕРМ СТИЛ. Проведено моделирование влияния изменения целого ряда величин на прогрев защищаемых им конструкций. Некоторые из результатов расчетов представлены на рис. 8, 9.

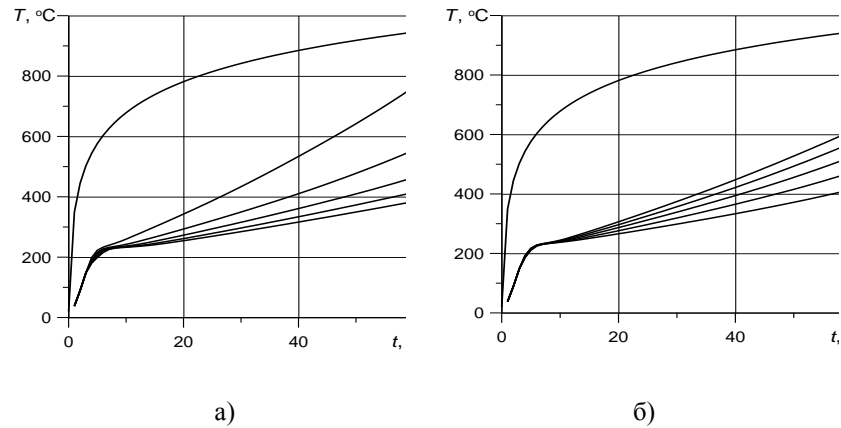


Рисунок 8 – Зависимости от времени температуры газовой среды (1) и стальных конструкций с приведенной толщиной 4 мм при кратности вспучивания равной (а): 20 (2), 40 (3), 60 (4), 80 (5), 100 (6); и значениях параметра Θ лучистого переноса в порах пенококса [4, 6], равных (б): 0 (2), $2 \cdot 10^{-11}$ (3), $4 \cdot 10^{-11}$ (4 - базовый вариант), $6 \cdot 10^{-11}$, $8 \cdot 10^{-11}$ (5), $10 \cdot 10^{-11}$ (6) Вт/м·К⁴.

Расчеты проведены при «стандартном» изменении температуры газовой среды (кривая 1). Толщина покрытия принята равной 1,2 мм. Защищаемая конструкция имела приведенную толщину металла 4 мм (она определяется делением площади поперечного сечения конструкции к ее обогреваемому периметру). При использовании понятия «приведенная толщина» на ненагреваемой поверхности конструкции задается условие теплоизоляции. На рис. 8, 9 указан базовый вариант с реальными свойствами покрытия, которые изменялись при моделировании в большую и меньшую сторону.

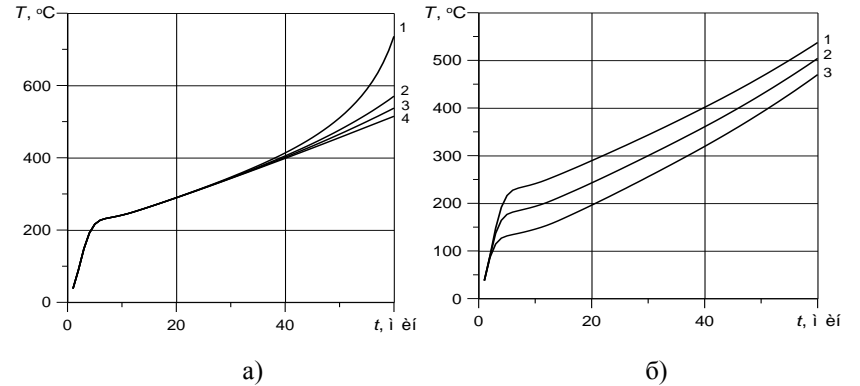


Рисунок 9 – Зависимости от времени температуры стальных конструкций при значениях параметра уменьшения толщины (уноса) пенококса ψ [4, 6], равных (а): 1,0 (1); 0,5 (2); 0,25 (3 - базовый вариант); 0 (4); и значениях температур начала вспучивания, равных (б): 230^{°C} (1 - базовый вариант), 180^{°C} (2), 130^{°C} (3).

Расчеты подтвердили, что наибольшее влияние на эффективность покрытий оказывает величина их вспучивания и параметры Θ и ψ . Это свидетельствует о важности обеспечения пенококса значительной толщины с минимальным поверхностным уносом (усадкой) со стабильной мелкопористой структурой. Показана существенная роль температуры начала вспучивания, что свидетельствует о важности ее снижения.

Одним из результатов параметрических расчетов является построение номограмм для оперативного определения толщин покрытий в зависимости от продолжительности высокотемпературного воздействия (заданного предела огнестойкости) приведенной толщины защищаемых конструкций и предельно допустимой для них температуры. На рис. 10 приведена номограмма для предельно допустимой температуры конструкций, равной 500^{°C}.

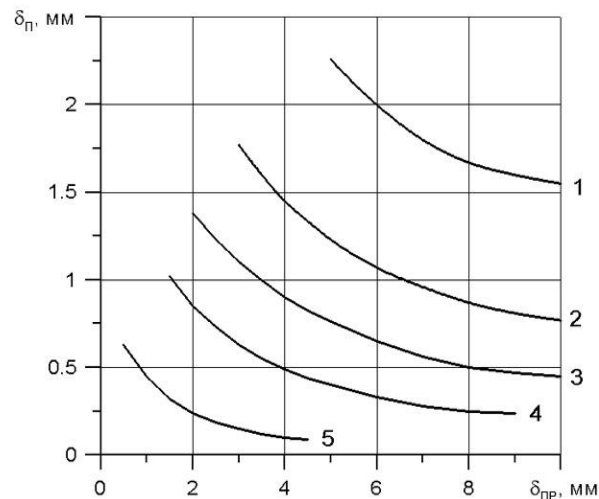


Рисунок 10 – Зависимости толщины покрытия ПРОТЕРМ СТИЛ от приведенных толщин стальных конструкций, обеспечивающие их предел огнестойкости 90 мин (1), 60 (2), 45 (3), 30 (4), 15 мин (5).

Анализ результатов параметрических исследований моделей огнезащиты, представленных, в частности, на рис. 8, 9, указывает на возможность их использования в ходе работ по целенаправленному изменению рецептур ОЗП с целью повышения их эффективности. Такие расчеты дают разработчикам рецептур объективную информацию о том, за счет каких эффектов и свойств можно добиться желаемого результата.

Результаты параметрических исследований для водосодержащих составов на минеральной основе, отличающихся наиболее сложным поведением в условиях пожара, демонстрируются на примере модельного вспучивающегося покрытия типа ОСП-1. Расчеты проведены для двух режимов пожара: стандартного температурного режима и не монотонного режима, характеризующегося ростом температуры газовой среды до 1000°C и последующим ее снижением.

Результаты параметрических исследований для водосодержащих составов на минеральной основе, отличающихся наиболее сложным поведением в условиях пожара, демонстрируются на примере модельного вспучивающегося покрытия типа ОСП-1. Расчеты проведены для двух режимов пожара: стандартного температурного режима и не монотонного режима, характеризующегося ростом температуры газовой среды до 1000°C и последующим ее снижением. Примеры расчетов отражены на рис. 11, 12.

В ходе расчетов моделировалось изменение целого ряда величин, в частности, коэффициента вспучивания, параметра Θ , температур начала и окончания вспучивания, толщин покрытия и защищаемых стальных конструкций, величин теплосъема с необогреваемой поверхности стальных конструкций. Установлено, как изменяется характер кривых температуры колонны при увеличении и уменьшении температур начала и окончания вспучивания. Эти результаты показали, что температура конструкции значительно уменьшается, а время существования характерного для водосодержащих материалов «плато» на уровне 100°C существенно возрастает при увеличении вспучивания.

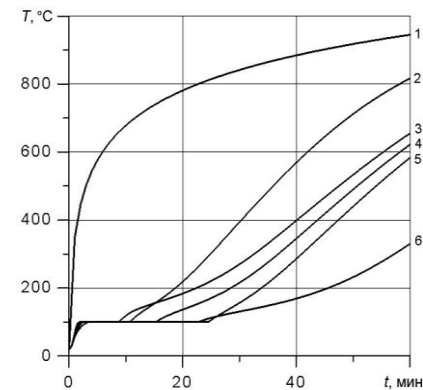


Рисунок 11 – Зависимости от времени температуры газовой среды (1) и стальных конструкций при кратности вспучивания, равных 4 (2), 7 (4), 12 (6-базовый вариант) и температуре начала вспучивания: 130°C (3), 100°C (4 – базовый вариант), 70°C (5).

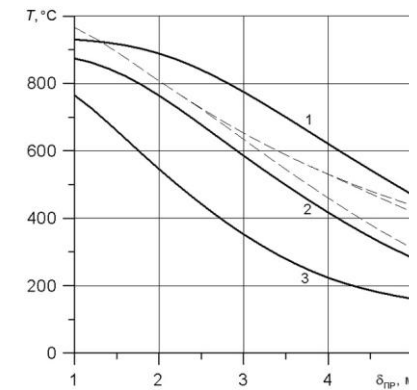


Рисунок 12 – Изменение температуры стальных конструкций от приведенной толщины металла для времени теплового воздействия 60 (1), 45 (2) и 30 мин (3): ——— - стандартный режим; - - - - - немонотонный режим.

Оценка влияния параметра Θ на величину нагрева защищаемой конструкции показала, что при трехкратном увеличении данного параметра приблизительно вдвое возрастает уровень нагрева конструкции и существенно уменьшается время существования «плато» на уровне 100°C . Расчеты для обоих температурных режимов показали, насколько это время зависит от толщины стальной пластины и интенсивности теплосъема с необогреваемой поверхности, т.е. суммарного коэффициента теплоотдачи от поверхности стальной конструкции в окружающую среду. Время существования «плато» на уровне 100°C значительно возрастает с увеличением теплосъема с необогреваемой поверхности, а также толщины стальных конструкций. Результаты моделирования позволяют построить номограм-

мы для оперативного определения толщин покрытий. В качестве примера на рис. 12 приведена подобная номограмма, построенная для покрытия ОСП-1 в зависимости от продолжительности высокотемпературного воздействия (заданного предела огнестойкости) приведенной толщины защищаемых конструкций и предельно допустимой для них температуры.

Подобные расчеты огнезащиты эффективны при подготовке и анализе результатов огневых испытаний конструкций с огнезащитой. С их помощью можно осуществлять более обоснованное назначение толщин огнезащиты для сертификационных огневых и прочих испытаний конструкций. Такие расчеты использовались и используются для объективного анализа и обобщения результатов огневых испытаний конструкций. При этом расчеты по апробированным методикам являются одним из путей подтверждения достоверности результатов и выявления ошибок при фиксации соответствующих рабочих параметров огневых испытаний, например, температуры защищаемых конструкций.

Таким образом, доказана на практике возможность и перспективность использования разработанных программных комплексов серии «Теплоогнезащита» и «Огнезащита» для целей проектирования, а также для проведения параметрических расчетов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Страхов В.Л., Гарашенко А.Н. Комплексное моделирование и оптимизация теплоогнезащиты // Сб. докл. межд. конф. «Современные проблемы внутренней баллистики РДТТ». Ижевск: Изд-во ИПМ УрО РАН, 1996. - С. 228-237.
2. Полежаев Ю.В., Юревич Ф.Б. Тепловая защита. - М.: Энергия, 1976. - 392 с.
3. Газодинамические и теплофизические процессы в ракетных двигателях твердого топлива / А. М. Губертов, В.В. Миронов, Д.М. Борисов и др.; под ред. А.С. Коротеева. - М.: Машиностроение, 2004. - 512 с.
4. Расчет прогрева и горения вспучивающихся покрытий / В.Л. Страхов, А.Н. Гарашенко, Г.В. Кузнецов и др. // Вопр. оборон. техники. Сер. 15. - 1991. - Вып. 6(100). - С. 12-15.
5. Страхов, В.Л., Гарашенко А.Н., Рудзинский В.П. Моделирование работы теплозащиты с учетом взаимосвязи физико-химических превращений со структурой и свойствами ее материала // Вопр. оборон. техники. Сер. 15. - 1998. - Вып. 1(118). - С. 25-27.
6. Страхов В.Л., Гарашенко А.Н., Рудзинский В.П. Математическое моделирование работы и определение комплекса характеристик вспучивающейся огнезащиты // Пожаровзрывобезопасность. - 1997. - Т. 6, № 3. - С. 21-30.

Фундаментальные основы баллистического проектирования
2010

Секция 8

Безопасность, экологичность,
технологии производства и утилизации



ТЕРМОКАТАЛИТИЧЕСКОЕ РАЗРУШЕНИЕ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

КРАСНОБАЕВ Ю.А., КАРЕЛИН В.А., ВОЛКОВ В.Е.

Военная академия РВСН имени Петра Великого

109074, Москва, Китайгородский проезд, д.9

т./факс (495) 698-13-20, E-mail: vladmelya@rambler.ru

Возрастающее потребление полимерных композиционных материалов (ПКМ), в составе которых имеются армирующие и дисперсные наполнители ведет к накоплению значительного количества отходов на их основе. Существующие способы ликвидации таких отходов предусматривают либо их захоронение, либо принудительное сжигание (инсинерацию). Оба эти направления являются затратными и характеризуются негативным воздействием на окружающую среду. Данная проблема имеет прямое отношение к элементам различных конструкций, в состав которых входят и армированные пластики, и материалы с дисперсным наполнителем – энергетические конденсированные системы (ЭКС).

Армирующие и дисперсные наполнители являются дорогостоящими материалами и их извлечение для последующего полезного использования может значительно сократить затраты на ликвидацию ПКМ. Применительно к ЭКС существует достаточно большое количество способов извлечения дорогостоящих компонентов [1-3], в результате которых на завершающем этапе образуется связующее с металлами. Широкий спектр способов объясняется тем, что каждый способ подходит для утилизации определенного вида ЭКС, что влияет на стоимость извлекаемых компонентов, а, следовательно, и сказывается на перспективах их повторного применения.

Поиск нового универсального способа утилизации как ЭКС, так и материалов с армирующими наполнителями позволит существенно упростить технологические операции и сократить расходы, сделает более привлекательным повторное использование извлекаемых компонентов за счет низкой стоимости.

В настоящее время ведутся работы по определению оптимальных условий низкотемпературного каталитического разложения полимерной матрицы с извлечением дорогостоящих волокон из ПКМ. Однако возможность использования этого процесса применительно к ЭКС не изучалась.

Термокаталитическое разрушение ЭКС и ПКМ [4], включает нагрев материала в инертной среде для извлечения наполнителя в процессе раз-

ложения полимерной матрицы. Инертная атмосфера исключает реакции горения, так что загрязнение воздуха в этом процессе ниже, чем при инсинерации. В результате термокаталитического процесса разрушения полимерной матрицы дорогостоящие компоненты сохраняются, так как обладают более высокими значениями температур плавления [5].

В процессе термокаталитического превращения полимерной матрицы происходит образование газообразных углеводородов [6]. Газообразные продукты возможно извлекать для дальнейшего использования или же безопасно уничтожать, например, сжиганием, без значительных затрат на фильтрацию, так как это продукты 3-4 класса опасности.

Для определения возможности применения низкотемпературного катализа для ЭКС проведены исследования со штатными топливными композициями на основе полибутадиенового связующего. С целью определения температуры, при которой начинается процесс разрушения полимерной основы, применен дифференциально-термический анализ.

Первым исследовался образец предварительно измельченной топливной системы, после извлечения окислителя и высокоэнергетических компонентов. В составе образца содержался А1, связующее СКД и катализатор деполимеризации связующего $AlCl_3$.

Во втором случае рассматривались образцы перспективных измельченных топливных композиций на основе полибутадиенового связующего с извлеченным окислителем. Степень извлечения окислителя после гидродинамического разрушения заряда ЭКС и дополнительного измельчения крошки ЭКС достигает 0,95 [7]. В составе образцов содержались высокоэнергетический компонент CL-20, А1, связующее СКДН + ТМ, технологические добавки и катализатор $AlCl_3$.

Данные дифференциально-термического анализа представлены на рис. 1. Полученные результаты показывают, что при температуре $145^{\circ}C$ начинается эндотермический процесс разложения связующего. До начала возгонки катализатора ($180^{\circ}C$) убыль массы составляет 12% и достигает 23% к началу разложения CL-20. При температуре $235^{\circ}C$ начинается разложение высокоэнергетического компонента CL-20.

Показано, что снижение температуры разложения связующего за счет использования катализатора позволит сохранить дорогостоящую компонентную базу. Использование катализатора $AlCl_3$ целесообразно для ЭКС, наполненных высокоэнергетическими компонентами с низкими температурами разложения, например, CL-20.

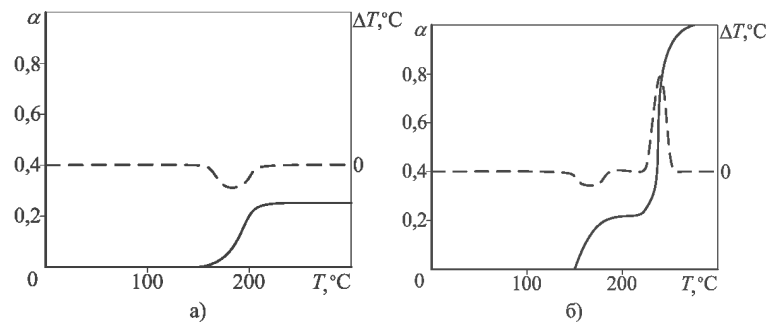


Рисунок 1 – Дериватограмма разложения α (—) и тепловых эффектов $\Delta T, ^\circ\text{C}$ (---) образцов:
 а) СКД + АСД-4 + AlCl_3 ;
 б) СКДН + ТМ + АСД-6 + CL-20 + AlCl_3 .

Температура разложения CL-20 значительно ниже штатного компонента октогена (282°C) [8] и составляет $230\text{--}240^\circ\text{C}$ [9], что расширяет температурный диапазон применения предлагаемого процесса для используемых ЭКС. В случае использования штатных ЭКС возможно применение различных катализаторов, например, CoCrO_4 . В ходе проведения экспериментальных работ было установлено, что разложение связующего на основе полибутадиена в присутствии хромата кобальта происходит в температурном диапазоне $220\text{--}240^\circ\text{C}$. Имея более высокие температуры разложения, штатные компоненты, такие как октоген, остаются в составе смеси. После разложения связующего твердая фаза разделяется механическим способом в сепараторе на фракции с различными плотностями.

Повысить прозводительность процесса возможно за счет применения технологий с использованием псевдооживленного слоя [4]. В состав псевдооживленного слоя входит как катализатор, так и инертный зернистый материал для отвода излишнего тепла. Также для регулирования температуры в реакторе возможно использования инертного газа, например, азота. Применение фильтров на выходе из реактора необходимо для улова газообразных углеводородов, образующихся при разложении связующего.

Также использование технологического оборудования и сырья термокаталитического процесса разложения композиционных материалов делает возможным с минимальными затратами выделять металлы. Выделение металлов до сих пор являлось нецелесообразным из-за некупаемости процессов разделения компонентов. Наиболее приемлемым способом их ликвидации считалось сжигание. Это вело к потере металлических компонентов и дополнительному загрязнению окружающей среды. С учетом того, что содержание металлов, например, алюминия, в топливных

композициях составляет 20-25% по массе, возможно компенсировать общие затраты на утилизацию не только за счет извлечения дорогостоящих компонентов, но и за счет сохранения и дальнейшего применения относительно дешевых металлов.

Таким образом, использование способа низкотемпературного катализа для рециклинга компонентов как из композиционных материалов, так и из остатков ЭКС после выделения дорогостоящих компонентов позволяет существенно снизить общие затраты на утилизацию и уменьшить количество выбросов и сбросов в окружающую среду.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мелешко В.Ю., Кирий Г.В. Ликвидация и утилизация ракетных топлив и зарядов. Учебное пособие. М.: ВА РВСН им. Петра Великого, 1998. 115 с.
2. Краснобаев Ю.Л., Мелешко В.Ю., Карелин В.А. и др. Способ регенерации нитраминов из смесевых твердых ракетных топлив на основе активного связующего. Патент РФ № 2237644, 2004.
3. Мелешко В.Ю., Карелин В.А., Гусев С.А. и др. Способ экологически чистой регенерации нитраминов из смесевых твердых ракетных топлив. Патент РФ №2145588, 2000.
4. Pickering S.J. Recycling Technologies for Thermoset Composite Materials – Current Status//Composites Part A.Applied Science and Manufacturing, 2006, Vol.37, №8, pp. 1206-1215.
5. Platz G.P. Resource Recovery by Catalytic Conversion of Polymers // US 5504267. 1996.
6. Davidson J. The Role of Recycled Carbon Fibre // Milled Carbon Ltd., UK.
7. Spas S.E. Resource recovery system // US 5331106. 1994.
8. Орлова Е.Ю., Орлова Н.А., Жилин В.Ф. и др. Октоген-термостойкое взрывчатое вещество. М.: Недра, 1975, 128с.
9. Материалы Международных конференций JCT (ФРГ), 1996-1999гг. R. Wordle. Доклад 27, 1996.Р. Braithwaite и др., доклад 4,1998.

РАССНАРЯЖЕНИЕ БОЕПРИПАСОВ МЕТОДОМ СТРУЙНОЙ КАВИТАЦИИ

МЕЛЕШКО В.Ю., КАРЕЛИН В.А., ГОРДЮХИН А.А., ЮРЧАК В.А.

Военная академия РВСН имени Петра Великого

109074, Москва, Китайгородский проезд, д.9

т./факс (495) 698-13-20, E-mail: vladmelve@rambler.ru

Опыт работы по вымыванию зарядов прессованных энергетических материалов (ЭМ) из снарядов калибром 76 и 100 мм показал, что процесс вымывания продолжается несколько десятков минут. Такая производительность представляется недостаточной, поскольку известны примеры гидрокавитационного вымывания ВВ из корпусов снарядов за меньшее время при меньших затратах энергии. Кроме того, увеличение калибра снарядов также требует повышения производительности при снижении энергетических затрат на вымывание. Вследствие этого, представлялось необходимым проанализировать возможность снижения энергетических затрат на вымывание ЭМ при использовании групповых струйных кавитирующих сопел за счет распределения разрушающей заряд ЭМ мощности струй при различных углах их наклона к поверхности.

Оценка влияния угла наклона одиночных кавитирующих струй к разрушаемой поверхности на удельную энергию разрушения была проведена по результатам воздействия кавитирующих струй на модельные заряды ЭМ при давлении 19 МПа и времени воздействия 5с. Полученные экспериментальные результаты представлены в табл.1.

Таблица 1

Влияние угла наклона сопла к поверхности на удельную энергию разрушения, МДж/м³, при различных расстояниях до поверхности

Расстояние до поверхности, х, мм	E _{уд.} МДж/м ³ , при угле наклона сопла к поверхности, α, град.				
	90	80	70	60	50
10	0,18	0,196	0,269	0,81	2,67
20	0,20	0,28	0,28	0,72	2,42
30	0,97	0,70	0,66	0,56	2,31
40	3,61	2,23	1,18	0,48	2,29

Из результатов, представленных в табл.1 следует вывод о том, что при сравнительно небольших расстояниях от сопла до разрушаемой поверхности удельная энергия разрушения струи наклонных сопел больше, чем у вертикально направленных.

Однако при увеличении расстояния до 30-40мм имеет место обрат-

ная картина: удельные энергии у наклонных сопел возрастают медленнее, чем у вертикальных. Это может быть вызвано большей площадью воздействия наклонных струй с меньшим динамическим давлением, но с большим числом кавитационных пузырьков, а также эффектом отлома фрагментов разрушаемого топлива. Кроме того, важным результатом проведенных экспериментов является тот факт, что наиболее интенсивно данный тип материалов разрушается при угле наклона сопла к поверхности, равном 60° и при расстоянии до разрушаемой поверхности 30-40мм.

Влияние совместной работы двух сопел оценивалось по данным испытаний при совместной работе вертикального и наклонного сопел с одинаковым выходным сечением в одном сопловом блоке. Угол наклона первого сопла к поверхности составил 60° , что было сделано на основании ранее проведенных экспериментов. Второе сопло было установлено вертикально к разрушаемой поверхности на расстоянии между осями сопел H . Сравнивались величины удельных энергий разрушения при использовании двух сопел с удельными энергиями разрушения, полученными из суммы затраченных энергий отдельными соплами и суммы объемов материала, удаленных отдельными соплами. Сравнение проводилось для различных расстояний соплового блока от поверхности топлива при диаметрах проходного сечения обоих сопел равных 1,70мм., а также при изменении диаметров сопел.

Данные, представленные в табл.2 и табл.3 показывают, что в зависимости от подбора пары сопел в блоке возможно существенное понижение суммарной удельной энергии разрушения материала. В первом приближении, это может быть объяснено уровнем согласованности частотных характеристик используемых сопел. В случае близких собственных частот колебаний резонаторов возможно усиление колебаний с повышением интенсивности кавитации и ростом производительности по удалению материала, т.е. снижение удельной энергии разрушения. В литературе описаны способы возбуждения колебаний скоростей струй в блоке сопел пространственным акустическим полем одного сопла, снабженного резонатором. Из результатов, приведенных в таблицах, следует, что можно достигнуть практически двукратного снижения удельной энергии разрушения при соответствующем подборе кавитирующих сопел в блоке.

В другом случае, когда колебания накладываются друг на друга в противофазе, возможно гашение колебаний и снижение колебаний скорости струи до минимума с соответствующим снижением интенсивности вихревой кавитации. Такого типа взаимодействия при проведении экспериментов в приведенных выше условиях не наблюдалось.

Таблица 2

Сравнение удельных энергий разрушения сопловым блоком
и отдельными соплами с $d_0=1,70\text{мм}$

Расстояние до поверхности, мм	$E_{\text{уд}}$, МДж/м ³			
	Двухсопловой блок	Вертикальное сопло	Наклонное сопло	По сумме двух отдельных сопел
10	0,26	0,18	0,81	0,50
20	0,37	0,20	0,72	0,46
30	0,83	0,97	0,56	1,53
40	2,38	3,61	0,48	4,09

Таблица 3

Удельные энергии разрушения сопловым блоком и отдельными соплами из этого блока, МДж/м³ для различных значений d_0

Диаметр сопла, мм	Расстояние до поверхности, мм	Сопловой блок	Вертикальное сопло	Наклонное сопло	По сумме двух отдельных сопел
1,52	5	0,13	0,27	0,41	0,34
	10	0,12	0,23	0,33	0,28
	15	0,14	0,28	0,33	0,31
1,75	10	0,27	0,29	0,30	0,30
	15	0,30	0,29	0,34	0,32
1,84	10	0,29	0,29	0,26	0,28
	15	0,35	0,35	0,29	0,32

Кроме того, снижение удельной энергии разрушения может объясняться увеличением объема фрагментов, образующихся между двумя промываемыми щелями при их отломе, как это схематично показано на рис.1. Это предположение требует правильного выбора расстояния между осями сопел H и H_1 для учета механических характеристик разрушаемого материала, обеспечивающего отлом максимального по объему фрагмента.

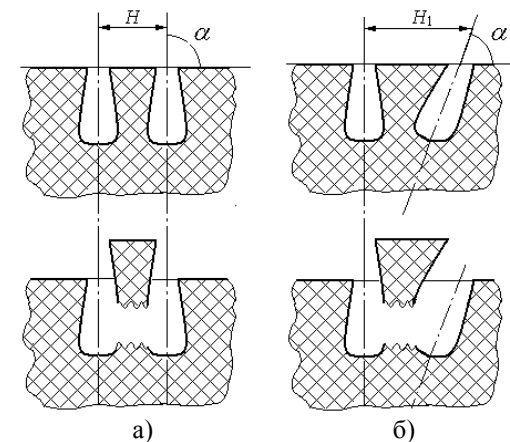


Рисунок 1 – Схема образования отламываемых фрагментов при соосном (а) и несоосном (б) расположении сопел

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА СЖИГАНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ В ИНСИНЕРАТОРАХ С КИПЯЩИМ СЛОЕМ

МЕЛЕШКО В.Ю.¹, КАРЕЛИН В.А.¹, НАУМОВ С.П.², КУЛИКОВА Т.Л.¹

¹Военная академия РВСН имени Петра Великого

109074, Москва, Китайгородский проезд, д.9

т./факс (495) 698-13-20, E-mail: vladmelve@rambler.ru

²ФГУП ФЦДТ «Союз»

140056, г.Дзержинский, Московской обл. т./факс (495) 551-73-29

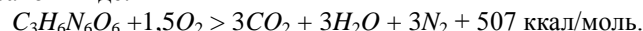
Утилизация фрагментированных энергетических материалов (ЭМ) приобретает значение в связи с развитием технологий вымывания взрывчатых наполнителей из корпусов боеприпасов и отсутствием возможности их дальнейшего использования. Накопление таких ВВ требует дополнительных расходов на хранение, охрану и контроль состояния.

В последние годы все большее количество отходов после расснаряжения боеприпасов и топлив подвергаются инсинерации путем измельчения отходов и заливки измельченных материалов водой для образования суспензии. Типы инсинераторов, используемых для уничтожения такой суспензии включают вращающиеся печи, камеры сгорания с псевдоожиженными слоями и пиролизические инсинераторы.

Основным достоинством инсинераторов с псевдоожиженным слоем считается низкий расход энергии. Это делает возможным извлечение из-

быточного тепла из реактора для полезного использования.

Сжигание, например, ЭМ с воздухом до конечных продуктов может быть записано в виде:



Упоминания в литературе об инсинерации отходов ЭМ в кипящем слое основаны на патенте США в котором описан процесс инсинерации отходов азотосодержащих материалов по схеме, которая минимизирует выброс оксидов азота. Предпочтительными катализаторами являются никель и его соединения [1].

Подача ЭМ в реактор в виде разбавленной водной суспензии не является оптимальным решением, хотя и удовлетворяет требованиям техники безопасности. Для повышения автономности установки часть воды в суспензии целесообразно заменить твердым горючим материалом. Смесь этого твердого горючего материала с ЭМ в виде пасты можно подавать в реактор, причем содержание ЭМ должно быть ограниченным проверенными безопасными концентрациями. Твердый горючий материал не должен давать зольных остатков для упрощения эксплуатации установки. В качестве дополнительного твердого горючего могут быть использованы измельченные полимерные материалы со сравнительно низкими температурами воспламенения [2].

Применительно к инсинерации 15 кг/ч ЭМ был проведен оценочный расчет параметров установки с учетом известного опыта конструирования камер сгорания (реакторов) с кипящим слоем.

В первом приближении соотношение компонентов энергетической пасты принято в виде: ЭМ:полиуретан:вода = 1:2:7 масс. частей, а в качестве дополнительного твердого горючего взят полиуретан.

Уравнение теплового баланса реактора на стационарном режиме:

$$m_1H_1 + m_2H_2 - m_3H_3 + m_4C_pT_0 + m_0C_pT^* = (m_0+m_1+m_2+m_3+m_4)C_{pf}T_f,$$

где m_1, H_1 - массовый расход и теплота сгорания ЭМ;

m_2, H_2 - массовый расход и теплота сгорания полиуретана;

m_3, H_3 - массовый расход и теплота испарения воды из пасты;

$m_4, C_{p,a}, T_a$ - массовый расход, удельная теплоемкость и температура поступающего в реактор воздуха;

$m_0, C_{p,0}, T^*$ - массовый расход зернистого материала слоя по линии рециркуляции, удельная теплоемкость зернистого материала и температура возвращаемого в реактор зернистого материала после охлаждения и очистки.

Расход воздуха для оценочных расчетов принят $m_4=12(m_1+m_2)$, где $L_0=12$ - стехиометрический коэффициент для топливной смеси с ЭМ. Для чисто углеводородных жидких горючих обычно принимают $L_0=14,7...15$ [3].

Правая часть этого выражения представляет энергонапряженность

реактора в МДж/с (МВт), на основании которой определяются его основные размеры:

$$E_{y0} = \frac{\sum_{i=1}^4 m_i H_i}{V} t_{np}, \text{ МДж/м}^3$$

где V - объем реактора с кипящим слоем;

t_{np} - время пребывания веществ в реакторе.

Оценка значений величины E_{y0} для различных реакторов с кипящим слоем по литературным данным, показывает, что в первом приближении можно принять $E_{y0} = 0,565 \text{ МДж/м}^3$, как оптимизированное значение для промышленной установки.

Для рассматриваемого случая с расходом ЭМ $m_1 = 4,17 \text{ г/с}$, расходом воздуха на сжигание $m_4 = 12(m_1 + m_2) = 36m_1$, расходом воды $m_3 = 7m_1$ и теплотой испарения $44,04 \text{ кДж/моль}$, рассчитаны энергонапряженность от сжигания пасты ЭМ с полиуретаном, геометрические характеристики реактора, высота слоя зернистого материала, распределение температур по объему реактора и др.

В приближенном расчете не учитывались тепловые потери в стенки, которые могут быть значительными при недостаточной теплоизоляции.

Проведенный оценочный расчет показывает возможность реализации такого процесса инсинерации ЭМ в автономной установке без использования электрического подогрева и с соблюдением требований по взрывобезопасности. Небольшой расход горючего позволяет использовать одноточечную подачу горючего в кипящий слой. Разрабатываемые устройства подачи должны обеспечить распределение пасты горючего материала по слою без перегрева ее в линиях подачи.

Предлагаемая установка (рис.1) включает реактор с кипящим слоем с внутренним диаметром 0,35 м и высотой 3,3 м, а также дегазатор снарядов диаметром 0,4 м. Работа реактора обеспечивается расходом дополнительного горючего с теплотой сгорания 25 МДж/кг около 30 кг/ч и воздухом низкого давления с расходом от $446 \text{ м}^3/\text{ч}$.

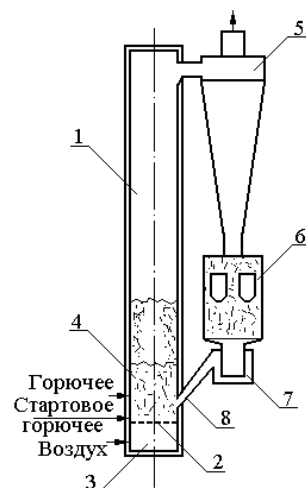


Рисунок 1 – Принципиальная схема установки для инсинерации ЭМ:

- 1- реактор; 2- распределительная решетка; 3- коллектор воздуха;
 4- слой зернистого материала (кипящий слой); 5 - циклонный сепаратор
 зернистого материала; 6- дегазатор снарядов; 7- затвор линии циркуляции;
 8- ввод охлажденного зернистого материала в кипящий слой

В конструкции реактора может быть сохранено распределение воздуха на первичный, для получения восстановительной атмосферы в слое и вторичный - для дожигания продуктов неполного сгорания, а также могут быть использованы катализаторы восстановления оксидов азота. Для повышения экологических характеристик никелевый катализатор целесообразно заменить на железный, а также применять горючие или добавки к ним, выделяющие при разложении аммиак, например, отходы мочевиноформальдегидных смол.

Переход к установкам утилизации ЭМ повышенной производительности 100...150 кг/ч потребует применения многоточечной подачи и изменения геометрии камеры для обеспечения распределения вводимой пасты по поперечному сечению слоя и создания защитных барьеров торможения локального самоускоряющегося горения ЭМ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Kalfadelis C.D., Skopp A. Incineration of nitrogenous materials. US 3916805. 1975.
2. Flammability Handbook of Plastics, by C.J.Hilado // 4-th Edn., Technomic. 1990.
3. Стечкин Б.С., Казанджан П.К., Алексеев Л.П. и др. Теория реактивных двигателей. Оборонгиз. 1958. 533 с.

АВТОРСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ

В	С
Волков В.Е.162	Селиванов В.В.18,47
Г	Соболев А.М.84
Гаращенко А.Н.148	Сообщиков А.Н.18
Глазырин В.П.8	Сотский М.Ю.61
Гордюхин А.А.166	Спиридонов В.В.125
Губарев Е.В.74	Стадник А.Л.25,36
Гусаров А.П.18	Сулаберидзе В.Ш.133,141
Е	Х
Ефремов Н.Ю.133	Хмельников Е.А.74
З	Ю
Захаренков В.Ф.5	Юрчак В.А.166
И	
Иоилев А.Г.25,36	
К	
Карелин В.А.162,166,169	
Краснобаев Ю.А.162	
Краюхин А.А.25,36	
Крыжко С.Л.141	
Куликова Т.Л.169	
М	
Марков А.В.84	
Марков В.А.18,47	
Мелешко В.Ю.166,169	
Могилев В.А.25	
Н	
Наумов С.П.169	
О	
Овчинников А.Ф.18,47	
Орлов М.Ю.8,55	
Орлова Ю.Н.8	
П	
Понятский В.М.96	
Попова М.А.74	
Пусев В.И.18,47	
Р	
Рудзинский В.П.148	

СОДЕРЖАНИЕ

Памяти Е.В. Чурбанова.

Захаренков В.Ф...... 5**СЕКЦИЯ 4. Взрыв, удар, защита**

4.1. Численное моделирование поведения льда при ударных и взрывных нагрузках.

Глазырин В.П., Орлов М.Ю., Орлова Ю.Н. 84.2. О механических и амортизирующих характеристиках сотовых конструкций из алюминиевых сплавов при сжатии и вторичном нагружении. **Гусаров А.П., Марков В.А., Овчинников А.Ф., Пусев В.И., Селиванов В.В., Сообщиков А.Н.** 18

4.3. Численное моделирование высокоскоростного проникания трубчатых ударников в бетон. Часть 1: Кавернообразование.

Иоилов А.Г., Краюхин А.А., Могилев В.А., Стадник А.Л. 25

4.4. Численное моделирование высокоскоростного проникания трубчатых ударников в бетон. Часть 2: Осевой выброс материала преграды.

Иоилов А.Г., Краюхин А.А., Стадник А.Л. 36

4.5. Основные особенности механических и амортизирующих свойств высокопористых алюминиевых сплавов и сотовых конструкций.

Марков В.А., Овчинников А.Ф., Пусев В.И., Селиванов В.В. 474.6. Влияние дополнительного слоя на процесс пробития и разрушения слоистых преград. **Орлов М.Ю.** 554.7. Метрологическое обеспечение технологий измерения замедления тел при высокоскоростном ударе. **Сотский М.Ю.** 61**СЕКЦИЯ 5. Эффективность действия**

5.1. Методика обработки результатов испытаний боевой части на осколочное действие.

Попова М.А., Губарев Е.В., Хмельников Е.А. 74

СЕКЦИЯ 6. Информационные, управляющие и иницирующие системы

- 6.1. Математическое моделирование автоматической системы контроля качества датчиков давления.
Марков А.В. Соболев А.М. 84
- 6.2. Математическое и программное обеспечение оценки качества моделей при идентификации характеристик элементов системы управления по экспериментальным данным.
Понятский В.М. 96
- 6.3. Методика анализа частиц на изображении в среде NI LABVIEW. **Спиридонов В.В.** 125
- 6.4. Создание автоматизированного испытательного оборудования на базе разрывной машины.
Сулаберидзе В.Ш. Ефремов Н.Ю. 133
- 6.5. Отказы свч-генераторов электромагнитных колебаний на основе диодов ганна.
Сулаберидзе В.Ш., Крыжко С.Л. 141

СЕКЦИЯ 7. Новые компьютерные технологии и средства компьютерного моделирования при проектировании

- 7.1. Результаты и перспективы компьютерного моделирования и проектирования теплозащиты и огнезащиты конструкций и изделий.
Гаращенко А.Н., Рудзинский В.П. 148

СЕКЦИЯ 8. Безопасность, экологичность, технологии производства и утилизации

- 8.1. Термокatalитическое разрушение полимерных композиционных материалов.
Краснобаев Ю.А., Карелин В.А., Волков В.Е. 162
- 8.2. Расснаряжение боеприпасов методом струйной кавитации.
Мелешко В.Ю., Карелин В.А., Гордюхин А.А., Юрчак В.А. 166
- 8.3. Исследование процесса сжигания энергетических материалов в инсинераторах с кипящим слоем.
Мелешко В.Ю., Карелин В.А., Наумов С.П., Куликова Т.Л. 169

Оригинал-макет оформлен при техническом содействии
Учебно-научно-производственного центра
компьютерных технологий
(ООО «УНПЦ КОМТЕХ»),
190005, Санкт-Петербург, 1-я Красноармейская ул., д.1.
E-mail: Kert@mail.ru
Компьютерное форматирование и верстка Е.В. Петрова

Подписано в печать 18.06.2011. Формат 60x84/16. Бумага документная.
Печать трафаретная. Усл. печ. л.11. Тираж 120 экз. Заказ № .
Балтийский государственный технический университет.
190005, Санкт-Петербург, 1-я Красноармейская ул., д.1.