



Орлов Ю.Н., Соловьев В.О.,  
Суслин В.М., Овчинников Н.М.

Моделирование взрывных  
нагрузок на металлические  
энергоаккумулирующие  
вещества и стенки  
отражателя

**Рекомендуемая форма библиографической ссылки:** Моделирование взрывных нагрузок на металлические энергоаккумулирующие вещества и стенки отражателя / Ю.Н.Орлов [и др.] // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. 2009. № 14. 20 с. URL: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2009-14>

**Ордена Ленина**  
**ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНОЙ МАТЕМАТИКИ**  
**имени М.В. Келдыша**  
**Российской Академии наук**

**Ю.Н. Орлов, В.О. Соловьев, В.М. Суслин, Н.М. Овчинников**

**Моделирование взрывных нагрузок на  
металлические энергоаккумулирующие вещества и  
стенки отражателя**

**Москва – 2009**

**Ю.Н. Орлов, В.О. Соловьев, В.М. Суслин, Н.М. Овчинников.**

**Моделирование взрывных нагрузок на металлические энергоаккумулирующие вещества и стенки отражателя.** Препринт Института прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, 2009, 20 страницы, 14 рисунков, библиография: 8 наименований.

Описываются результаты моделирования распространения ударной волны, порожденной взрывным воздействием, в слоистой жидкометаллической структуре, которая может выполнять роль первой стенки взрывной камеры в импульсном реакторе. Расчеты сравниваются с натурными испытаниями, проведенными на свинце.

**Y.N.Orlov, V.O.Soloviev, V.M.Suslin, N.M.Ovchinnikov. The modeling of explosion influence on energy accumulating media and reflector metal walls.** Preprint, Inst. Appl. Mathem., Russian Academy of Sciences, 2009, 20 Pages, 14 Figures, 8 References.

The results of mathematical modeling of shock wave impact, which arise from explosion, are discussed. The liquid multi-layer structure is considered as the first wall of impulse reactor chamber. The simulations are compared with experiments on lead.

## 1. Введение

Настоящая работа продолжает исследования [1] по моделированию воздействия ударной волны и продуктов сгорания взрывчатых веществ (ВВ) на преграду, выполненную из металла, композитных материалов, или имеющую слоистую структуру. Исходная цель такого моделирования состояла в том, чтобы провести расчет ударно-волновой нагрузки на стенку камеры предполагаемого термоядерного реактора в концепции тяжелоионного синтеза (Fast Ignition Heavy Ion Fusion). Эта концепция была сформулирована в работах [2-4].

Для валидации расчетного кода [5] необходимо было провести серию экспериментов по взрывному нагружению материалов и сравнить экспериментальные и расчетные параметры по скорости их деформации. Эти эксперименты должны были также дать возможность оценить характерные величины используемых в модели коэффициентов вязкости и теплопроводности в широком диапазоне изменения температур и давлений. В результате были получены новые данные по взаимодействию продуктов взрыва с плоской преградой, имеющие и самостоятельную ценность. Кроме того, расчет процессов распространения ударной волны по преграде, испарения при тепломеханическом воздействии на нее продуктов взрыва и последующего разлета разрушенных фрагментов преграды в окружающей среде имеет большое значение и в иных прикладных областях.

В ходе проведения экспериментов по взрывному нагружению материалов была разработана концепция импульсного детонационного двигателя (ИДД), имеющего в основе принцип создания тяги путем последовательного инициирования зарядов конденсированного ВВ, размещенных на соосных плоских отражателях, покрытых энергоаккумулирующим легкоплавким металлом. Создание такого устройства требует решения ряда первоочередных задач.

В частности, необходимо определить основные динамические характеристики процесса взрыва заряда конденсированного взрывчатого вещества (КВВ) на единичном отражателе с целью определения влияющих на создаваемую тягу факторов. Такими факторами являются: оптимальная с газодинамической точки зрения форма заряда КВВ; соотношение между массой заряда и диаметром плоского отражателя, исключаящее перерасширение продуктов детонации за пределы отражателя; соотношение между массами заряда и вовлеченного в процесс создания тяги на отражателе энергоаккумулирующего металла; влияние задействованного в процессе энергоаккумулирующего металла на газодинамическую картину истечения продуктов детонации и, как следствие, на удельный импульс единичной сборки в целом.

В настоящей работе представлены результаты численного моделирования и серии экспериментов, в которых была предпринята попытка определения основных закономерностей и особенностей работы единичной сборки «заряд – отражатель – энергоаккумулирующее покрытие» с целью

создания научной основы для разработки многоциклового ИДД вышеозначенного типа.

## 2. Краткое описание экспериментов

Были проведены экспериментальные исследования по изучению влияния продуктов взрыва при инициировании натуральных конструкций зарядов взрывчатого вещества (ВВ) в стальных отражателях реального калибра, геометрии и конструкции, находящихся в различных средах: вода, воздух, а также «горная порода-воздух». Эксперименты проводились на специально разработанной «Установке для исследования воздействия взрыва», имитирующей за один цикл работу детонационного ракетного двигателя в естественных средах, а также работу откатного взрывогенератора, разрушающего горные породы на натуральных конструкциях отражателей и зарядов ВВ.

Для проведения исследований в воздухе и воде установка крепилась к специально разработанной взрывной камере, выполненной в виде восьмигранника с диаметром по вписанной окружности 2,5 м и высотой 4,2 м. На установке исследовались неразрушаемые отражатели диаметром до 0,5 м с углом полураствора от  $0^\circ$  до  $90^\circ$ , включая и полусферические.

Было проведено моделирование взрыва зарядов ТНТ массой 12 г и плотностью 1,64 в двумерной геометрии. Сравнивались три типа цилиндрических заряда с соотношениями между диаметром и высотой 1/6, 6, и 1. Ось симметрии заряда совпадала с осью симметрии задачи. Моделирование проводилось с использованием газодинамического кода для моделирования нестационарных потоков «Turbojet». Расчетная область была образована сеткой 300x300 ячеек с размером ячейки 1 мм. Заряд инициировался во всех случаях сверху из соображения придания продуктам максимального вектора массовой скорости направленного к жесткой стенке. Боковая и верхняя границы расчетной области были проницаемыми.

Основной целью проведенных работ являлось изучение влияния продуктов взрыва при инициировании натуральных конструкций зарядов различных ВВ массой до 25 г в неразрушаемых стальных полужамкнутых камерах-отражателях различной геометрии с углом полураствора от 0 до 90 градусов, включая и полусферические формы. Диаметр отражателей изменялся от 100 до 500 мм.

В качестве различных ВВ применялись: ТЭН, гексоген, ТГ50/50, ТНТ, аммонит 6 ЖВ. Масса метаемого изделия в экспериментах изменялась от 40 до 80 кг. В результате анализа экспериментальных результатов было установлено, что при фиксированной площади и геометрии отражателя, а также массы единичного заряда ВВ существует точка максимума для удельного импульса, зависящая от присоединенной массы, вовлекаемой в движение продуктами взрыва, и калибра отражателя. Величина максимума удельного импульса возрастает с увеличением плотности или вязкости

окружающей среды, что объясняется, с одной стороны, возрастанием силы сопротивления окружающей среды и инерционности изделия, с другой стороны – увеличением интенсивности волновых процессов продуктов детонации, протекающими между отражателем и окружающей средой, и вовлечением этой среды в движение многократными отражениями, возникающими на границах раздела плотных сред.

Для газа и жидкости удельный импульс возрастает с увеличением плотности или вязкости окружающей среды. Для среды «горная порода – воздух» величина отката и удельный импульс имеют две зоны максимума. Первый максимум связан с максимальной текучестью пород в данной зоне, а второй – наибольший – максимум объясняется оптимальным соотношением объема образуемой в породе полости и геометрией отражателя и, как следствие, максимальным временем удержания давления ПД в зоне отражателя.

Впервые экспериментально было установлено, что при работе в воде и в среде «горная порода-воздух» при увеличении площади отражателя в 16 раз при фиксированном (плоском) угле полураствора отражателя удельный импульс возрастает соответственно в 12 раз и в 2 раза. Были получены эмпирические зависимости, согласно которым: при фиксированной массе пульсирующего взрывного устройства (ПВУ) и заряда ВВ удельный импульс возрастает с увеличением плотности или вязкости окружающей среды; при стремлении площади отражателя к площади заряда ВВ удельный импульс стремится к сближению в различных средах, что объясняется переходом к торцевому воздействию детонационной волны на отражатель; при фиксированных площади и геометрии отражателя, массе единичного заряда ВВ существует точка максимума удельного импульса, зависящая от массы ПВУ и его калибра, которая смещается в сторону увеличения массы (инерционных сил) изделия с увеличением плотности или вязкости окружающей среды, что объясняется, с одной стороны, силами сопротивления окружающей среды и инерционности ПВУ, с другой стороны – волновыми процессами продуктов детонации (ПД), протекающими между отражателем и окружающей средой, и вовлечением этой среды в движение.

Таким образом, для воды наиболее оптимальным является плоский, либо цилиндрический отражатель, а для среды «горная порода-воздух» – плоский отражатель. Для среды «горная порода-воздух» при изменении геометрии отражателя (т.е. угла полураствора от 0 до 90 градусов) удельный импульс может изменяться в 4 раза, а для воды – незначительно, в 1,2 раза.

Была проведена также серия экспериментов по определению влияния энергоаккумулирующего покрытия на поверхности стального отражателя. В качестве такого материала использовался свинец, как наиболее доступный материал. Были проведены экспериментальные исследования по определению параметров процессов, происходящих при срабатывании единичной сборки «заряд – отражатель – энергоаккумулирующее покрытие». Были проведены эксперименты, в которых фиксировалась посредством

набора разноудаленных от заряда оптоволоконных приемников свечения и ножевых датчиков давления динамика движения облака ПД и УВ.

Исследовались заряды равной массы, помещенные на слои энергоаккумулирующего металла (свинца) различной толщины. Также был проведен опыт с зарядом в два раза большей массы для сравнения. В опытах фиксировались масса свинца вовлеченного в истечение ПД, моменты прохождения УВ и ПД оптоволоконных приемников и датчика давления размещенного на краю 500 мм отражателя с целью определения момента отрыва УВ от контактной поверхности, отраженная от выбрасываемого свинца УВ (которая предварительно отразилась от стенки, на которой размещены датчики давления) с целью определения положения в облаке ПД зоны с высокой плотностью (образованной выброшенным легкоплавким металлом), а также велась скоростная видеосъемка с целью выяснения особенностей движения облака ПД и выброшенного свинца.

Эксперименты сопровождалось численным моделированием с различной степенью приближения к условиям эксперимента с целью верификации кода и разработки методики проведения численного эксперимента. Толщина свинцовых пластинок изменялась от 2 мм до 9 мм, а количество пластин в сборке - от 1 до 3. В качестве ВВ использовались: гексоген, скальный аммонит №3, ТЭН с плотностью 1 г/см<sup>3</sup> и массой от 6 г до 18 г. В качестве прессованного ВВ использовался ТГ 50/50 с плотностью 1,5-1,6 г/см<sup>3</sup> и массой от 7,5 г. до 8 г. Диаметр и высота заряда совпадали. В результате экспериментов была установлена зависимость массы расплавленного и отколотого свинца от энергетических характеристик заряда ВВ и толщины пластины. Также была установлена возможность защиты отражателя за счет использования энергоаккумулирующих составов с диаметром пластин, не превышающих двух диаметров заряда. Было установлено, что многослойные пластины в определенном диапазоне толщины дают эффект увеличения удельного импульса. При определенных энергетических характеристиках заряда ВВ и толщины пластины был обнаружен режим, подобный кумулятивному выбросу вещества; с уменьшением массы ВВ и увеличением толщины пластины указанный эффект сглаживался.

### **3. Моделирование взрыва зарядов различной формы**

Поиск оптимальной формы заряда, детонирующего на поверхности жесткого металлического отражателя необходимо вести по критерию максимального интегрального вектора массовой скорости продуктов детонации (ПД), направленного после расширения (ПД) по нормали от поверхности отражателя. Действительно, поиск оптимума, по сути, сводится к поиску такой формы заряда, при которой как можно большая часть продуктов расширяется в направлении от поверхности отражателя, сообщая отражателю импульс пропорциональный произведению нормального вектора

массовой скорости на массу ПД. Следует иметь в виду, что ПД, имеющие составляющую массовой скорости вдоль отражателя не будут совершать полезной работы, как и продукты, отброшенные при взрыве КВВ на некоторое расстояние от заряда.

Наиболее простым методом поиска оптимума формы заряда является параметрическое двумерное численное моделирование задачи о взрыве зарядов различной формы на жесткой стенке, в котором параметром по которому будет определяться оптимум формы заряда, назовем его «фактор нормальной тяги»  $N$ , будет являться соотношение между суммами произведения модулей нормальных и параллельных отражателю векторов массовой скорости на массы ПД в ячейках, принадлежащих элементарным объемам ячеек разностной сетки, взятое в процентах от суммы всех векторов, с учетом массы ПД находящихся в пределах разностной сетки. Физически этот параметр будет определять импульс тяги, развиваемый сборкой в направлении нормали к поверхности отражателя. Чем этот параметр будет больше, тем больший удельный импульс будет у сборки при равной массе заряда КВВ.

Важно отметить, что сравнение параметров, определяющих импульс тяги, имеет смысл проводить только в случае произведения среднего по равному шагу времени  $N$  на количество шагов расчета  $n$  ( $N_{эфф}$ ), или в течение эффективного периода истечения продуктов (ЭПИ или  $T_{истеч.}$ ). При этом длительность ЭПИ выбирается не до момента полной разгрузки отражателя, а до некоторого значения, определяемого частотой работы многоциклового ИДД и оценочным временем отброса отработавшей внешней сборки. В данной работе было сделано предположение, что частота работы ИДД может составлять до 1 кГц, а время отброса предыдущей сборки составит несколько сотен микросекунд. Исходя из этого, был выбран ЭПИ составляющий 150 мкс.

В расчетах в качестве ориентировочных начальных данных для тестирования численного метода использованы данные об энерговыделении ВВ, полученные в ходе экспериментов, описанных в [6]. Расчеты газодинамики проводились по методике, описанной в [7].

В расчетах моделировались поля давлений, массовой доли продуктов детонации, нормальной и ортогональной массовых скоростей в различные моменты времени для зарядов различной формы. Оказалось, что отделение УВ от контактной поверхности (КП) в плоскости жесткой стенки раньше всего происходит в заряде в виде плоского диска. В заряде, где высота и диаметр равны, УВ отходит от КП за 60 мкс. В заряде в виде столбика УВ не отходит от КП даже за 80 мкс. Обращает на себя внимание значительная разница в ортогональной и нормальной массовых скоростях продуктов на различных стадиях истечения различных по форме зарядов. Для всех численных экспериментов был определен параметр  $N_{эфф}$ , который составил соответственно для заряда в виде диска 31%, для заряда в виде столбика 12% и для заряда с равными диаметром и высотой 46%. Следовательно, наиболее

эффективной формой является последний заряд. Представленная методика оценки эффективности действия ПД от зарядов различной формы показала свою эффективность и будет использована при дальнейшей оптимизации сборок.

#### 4. Результаты численного моделирования

Приведем результаты численного моделирования воздействия взрыва ВВ на жидкометаллическую свинцовую плоскую преграду. Показаны данные для первой расчетной ячейки (поверхность преграды) для двух вариантов зарядов, различающихся по мощности в 2 и 10 раз.

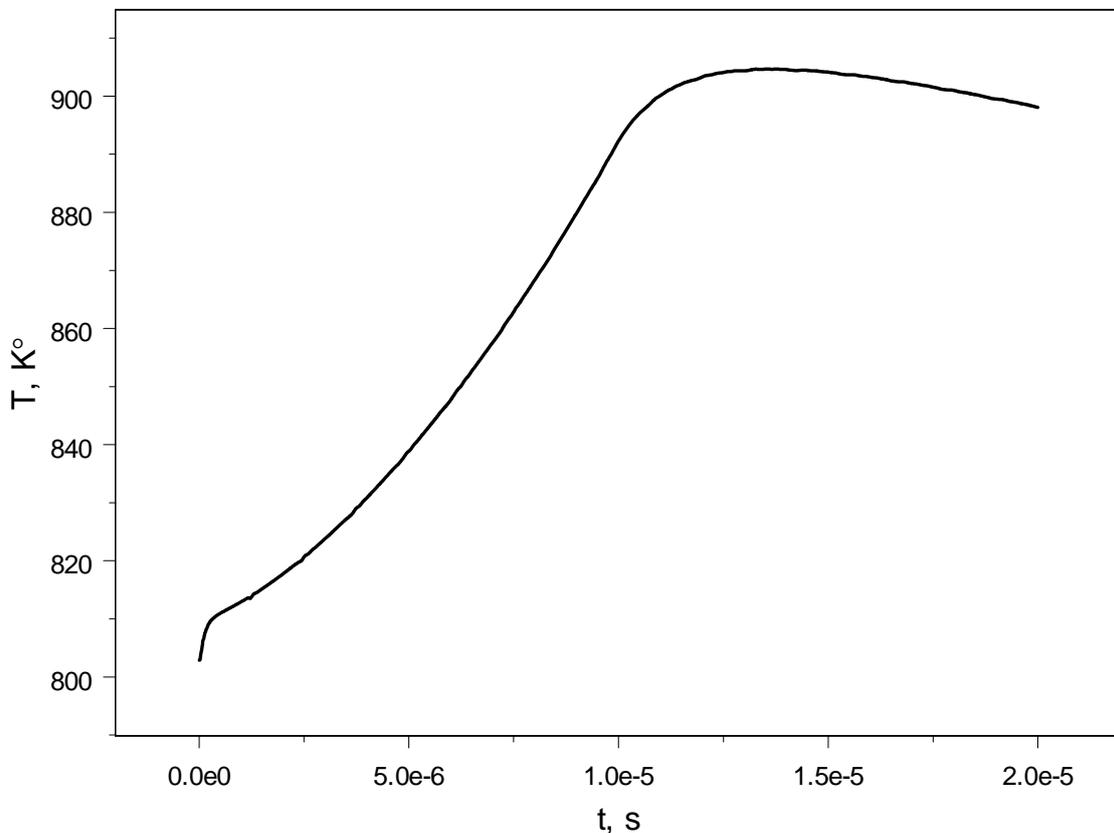


Рис. 1. Температура первой ячейки в зависимости от времени. Вариант 1

Расчет воздействия взрыва заряда небольшой мощности на жидкометаллическую преграду из свинца приводит к быстрому росту температуры приблизительно на 100 градусов и сравнительно медленному ее снижению. Плотность же преграды растет и затем релаксирует с более быстрым темпом.

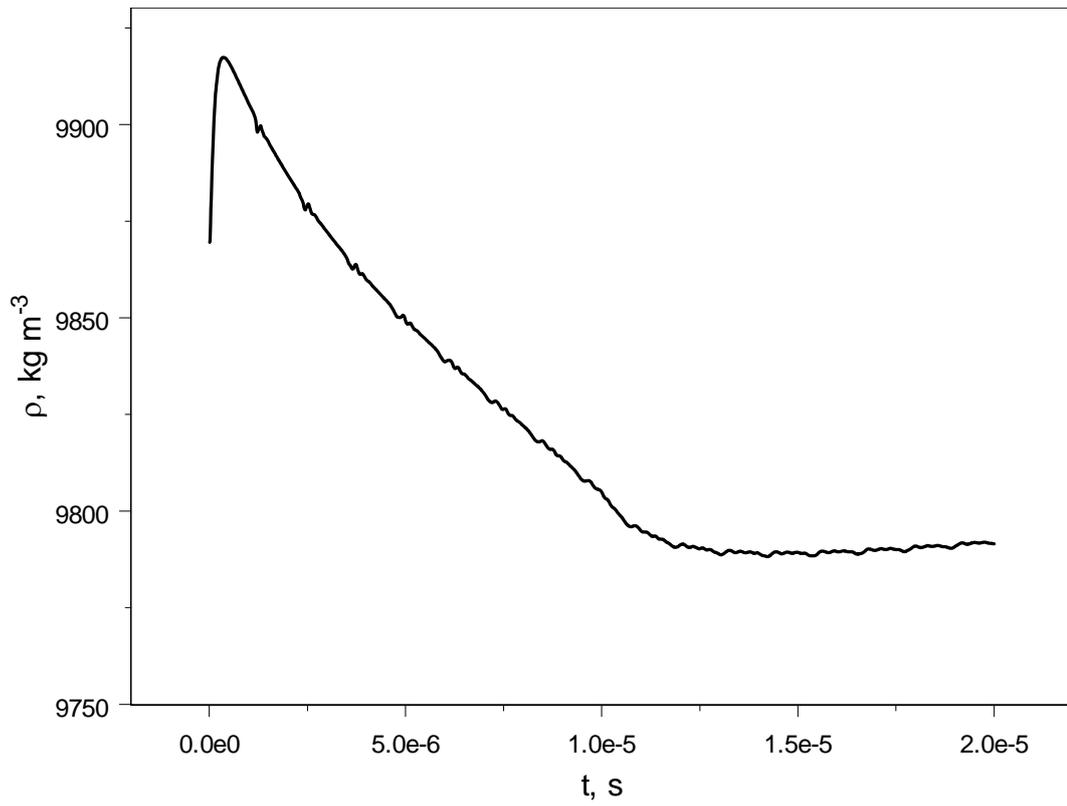


Рис. 2. Плотность первой ячейки в зависимости от времени. Вариант 1

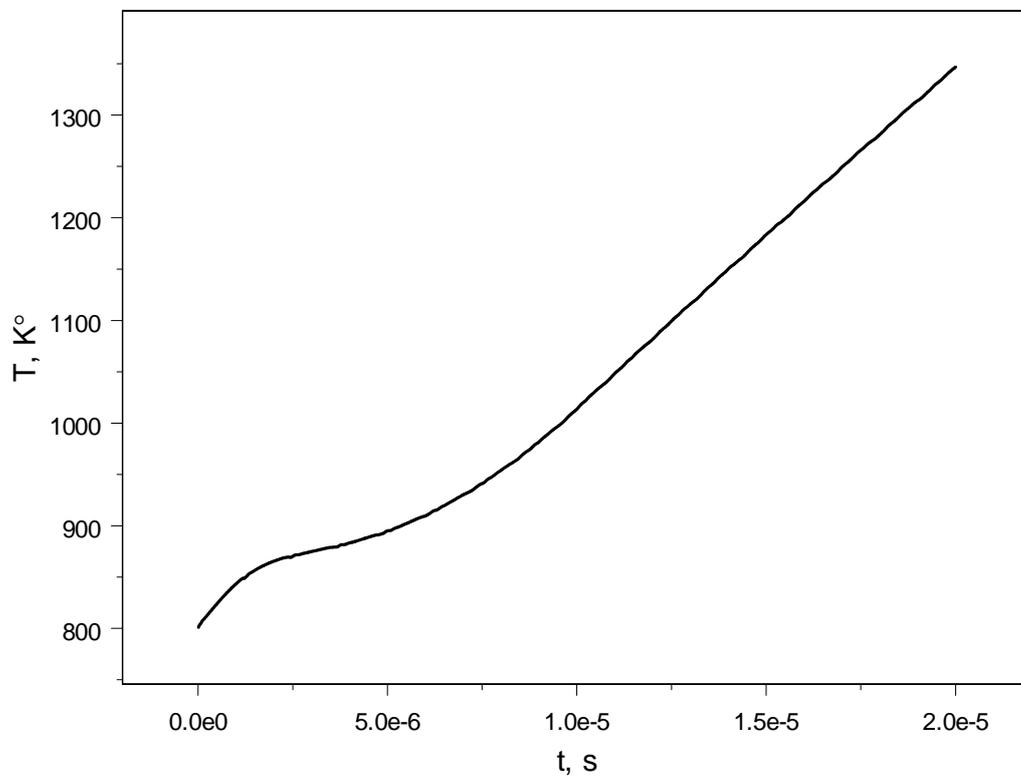


Рис. 3. Температура первой ячейки в зависимости от времени. Вариант 2

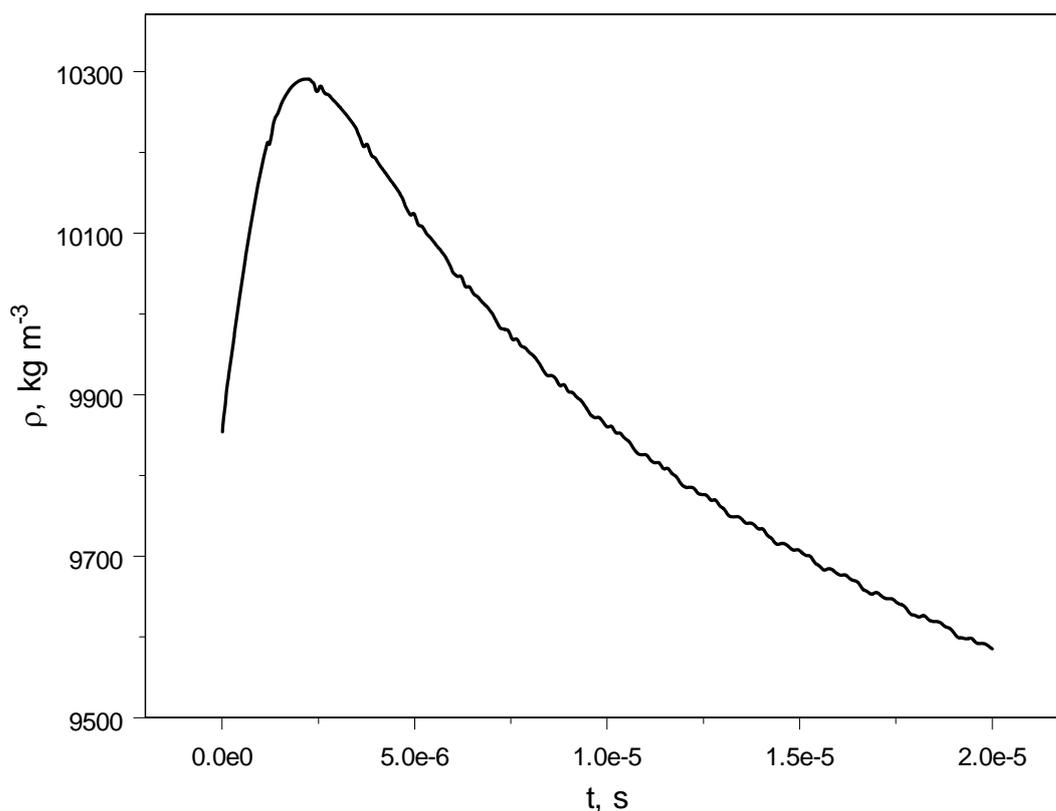


Рис. 4. Плотность первой ячейки в зависимости от времени. Вариант 2

При использовании заряда большей мощности существует расчетный режим продолжающегося роста температуры даже на стадии релаксации плотности.

### 5. Определение газодинамической картины при взрыве заряда на слое энергоаккумулирующего металла

После определения оптимальной формы заряда были проведены экспериментальные исследования по определению параметров процессов, происходящих при срабатывании единичной сборки «заряд – отражатель – энергоаккумулирующее покрытие». Были проведены эксперименты, в которых фиксировалась посредством набора разноудаленных от заряда оптоволоконных приемников свечения и ножевых датчиков давления динамика движения облака ПД и УВ. Исследовались заряды равной массы, помещенные на слои энергоаккумулирующего металла (свинца) различной толщины. Также был проведен опыт с зарядом в два раза большей массы для сравнения. В опытах фиксировались масса свинца вовлеченного в истечение ПД, моменты прохождения УВ и ПД оптоволоконных приемников и датчика давления размещенного на краю 500 мм отражателя с целью определения момента отрыва УВ от контактной поверхности, отраженная от

выбрасываемого свинца УВ (которая предварительно отразилась от стенки, на которой размещены датчики давления) с целью определения положения в облаке ПД зоны с высокой плотностью (образованной выброшенным легкоплавким металлом), а также велась скоростная видеосъемка с целью выяснения особенностей движения облака ПД и выброшенного свинца. Эксперименты сопровождалось численным моделированием с различной степенью приближения к условиям эксперимента с целью верификации кода и разработки методики проведения численного эксперимента.

Были использованы заряды ТГ 50\50 цилиндрической формы массой порядка 8 г (17,9 г в случае опыта с зарядом удвоенной массы) которые инициировались заглубленным внутрь заряда капсюлем-детонатором 202 мгновенного действия. Заряды устанавливались на стопки свинцовых диски диаметром 120 мм набранные из листов различной (2-3 мм) толщины.

Свинцовые диски, в свою очередь, устанавливались в центре стального диска-отражателя диаметром 500 мм и толщиной 15 мм. Заряды инициировались сверху. Отражатель устанавливался на виброизолирующее основание. От заряда к периферии отражателя с шагом 7 см были наклеены на виброизолирующих проставках четыре оптических волокна, диафрагмированные до угла  $15^\circ$  и установленные по касательной к контактной поверхности ПД. Первое волокно отстояло на 3 см от центра заряда, последнее было в одном сечении с чувствительным элементом тензорезистивного датчика давления ДДЗ-026 ножевого типа ориентированного вдоль набегающего от заряда потока и закрепленного на металлической стенке, отстоящей на 5 см от края отражателя.

Для оценки амплитуды УВ (кривой затухания) использовался второй датчик, установленный в 36 см от заряда. Первые три оптоволоконна были подключены к одному каналу осциллографа, последнее, находящееся в одном сечении с датчиком давления к другому. Скоростная съемка проводилась видеокамерой VS-FAST с частотой кадров 20000 кадр/с, и временем экспозиции кадра 10 мкс. Эксперимент управлялся специально сконструированным устройством, которое запускало одновременно видеокамеру и регистратор давления и затем с задержкой в 50 мкс выдавало сигнал на инициирование капсюля. Осциллограф, регистрирующий свечение, синхронизировался по уровню сигнала на первом от заряда оптоволоконном приемнике.

Скорость отраженной от стенки УВ обычно составляет 300-400 м/с, что позволяет оценить положение зоны с повышенной плотностью на дистанции 15-20 см от центра заряда в момент времени 80 мкс после инициирования. Последующее моделирование подтвердило это предположение. Таким образом, используя численное моделирование и несколько датчиков давления, расположенных вместе с вертикальными жесткими стенками на различных расстояниях от заряда, можно отслеживать динамику движения выброшенного от отражателя энергоаккумулирующего металла в различных направлениях (датчики с отражающими стенками можно установить и над

зарядом). Однако такие эксперименты (безусловно, необходимые для оптимизации одной или нескольких сборок) должны сопровождаться численными повторами эксперимента для точного позиционирования предполагаемой границы зоны с повышенной плотностью внутри облака ПД.

Ниже подробно описаны и проанализированы результаты проведенных взрывных экспериментов в различных средах с целью выявления зависимости величины разрушения защитного (энергоаккумулирующего) покрытия отражателя от величины удельного импульса. Эти результаты качественно близки к расчетным по газодинамической модели [5].

### 6. Анализ результатов экспериментов

Удельный импульс в средах «воздух» и «горная порода-воздух» рассчитывался через величину отката  $\Delta h$ , измеряемого с ошибкой 10 - 15%, по формуле [8]

$$J_y = \frac{F}{\dot{m}_3} = \frac{M_y \sqrt{2g\Delta h}}{m_3},$$

где  $J_y$  - удельный импульс, м/с;

$$m_3 = m_B + m_D,$$

$m_3$  - масса ВВ заряда, затраченная для совершения работы за один цикл, кг;

$m_B$  - масса основного ВВ, затраченная для совершения работы за один цикл;

$m_D$  - масса ВВ в детонаторе;

$\dot{m}_3$  - секундный расход массы ВВ зарядов, кг/с;

$\dot{m}_B$  - секундный расход массы основного ВВ, кг/с;

$\dot{m}_D$  - секундный расход массы ВВ в детонаторе, кг/с;

$M_y$  - общая масса откатного устройства, кг.

Удельный импульс в воде рассчитывался с учетом силы сопротивления окружающей среды по формуле

$$J_y = \frac{M_y \sqrt{2g\Delta h} + C_x S \rho_0 g \Delta h}{m_3},$$

где приняты обозначения:

$C_x$  - коэффициент сопротивления;

$S$  - мидель подвижной механической части, имитирующей работу ПВУ, м<sup>2</sup>;

$\rho_0$  - плотность окружающей среды, кг/м<sup>3</sup>.

Принятая поправка дает нулевой прирост удельного импульса при движении ПВУ в воздухе и увеличивает удельный импульс более чем в 5,5 раза при движении устройства в воде для  $M_y = 60$  кг,  $m_3 = 0,013$  кг,  $d_{\text{пр}} = 0,5$  м и  $\alpha = 90^\circ$  (диаметр и угол полураствора отражателя от вертикальной оси).

Для данных характеристик максимальный удельный импульс в воде равен  $J_{y \text{ max}} = 121469$  м/с.

В воздухе максимальный удельный импульс соответствует величине, равной  $J_y = 3297$  м/с, что было получено при  $M_y = 60$  кг,  $m_3 = 0,013$  кг,  $d_{\text{пр}} = 0,0892$  м и  $\alpha = 0^\circ$ .

Для газа и жидкости удельный импульс возрастает с увеличением плотности или вязкости окружающей среды. Для среды «горная порода – воздух» при фиксированных параметрах ПВУ величина отката  $\Delta h$ , а следовательно, и удельный импульс имеет две зоны максимума. Данный факт объясняется физико – механическими свойствами горных пород и формулой тяги:

$$F = m_{\text{рт}} W_{\text{рт}} + S ( P - P_o )$$

где

$F$  - среднеинтегральный показатель тяги ПВУ, н;

$m_{\text{рт}} = m_{\text{пд}} + m_{\text{ос}}$  - секундный расход рабочего тела, кг/с;

$m_{\text{пд}}$  - секундный расход ПД, кг/с;

$m_{\text{ос}}$  - секундный расход окружающей среды, вовлекаемой в движение, кг/с;

$W_{\text{рт}}$  - среднеинтегральный показатель скорости рабочего тела, м/с;

$S$  - площадь сечения среза отражателя, м<sup>2</sup>;

$P$  - среднеинтегральный показатель давления ПД, н/м<sup>2</sup>;

$P_o$  - противодействие окружающей среды, н/м<sup>2</sup>.

Первый максимум наблюдался при значениях крепости пород  $f = 0,3 \div 0,4$ , что объясняется максимальной текучестью пород в данной зоне под действием ПД и, как следствие, максимальным значением параметра  $m_{\text{рт}} W_{\text{рт}}$ . Второй максимум (наибольший) наблюдался при  $f = 3$ , что объясняется оптимальным соотношением объема образуемой в породе полости и геометрией отражателя и, как следствие, максимальным временем удержания давления ПД в зоне отражателя -  $S ( P - P_o )$  и разгона ПВУ.

Проведенные эксперименты показали, что при фиксированных параметрах ПВУ высота отката -  $\Delta h$ , а, следовательно, и удельный импульс -  $J_y$  могут отличаться в 2,6 раза при изменении коэффициента крепости пород -  $f$ . Зависимость отката от крепости породы показана на рис. 5.

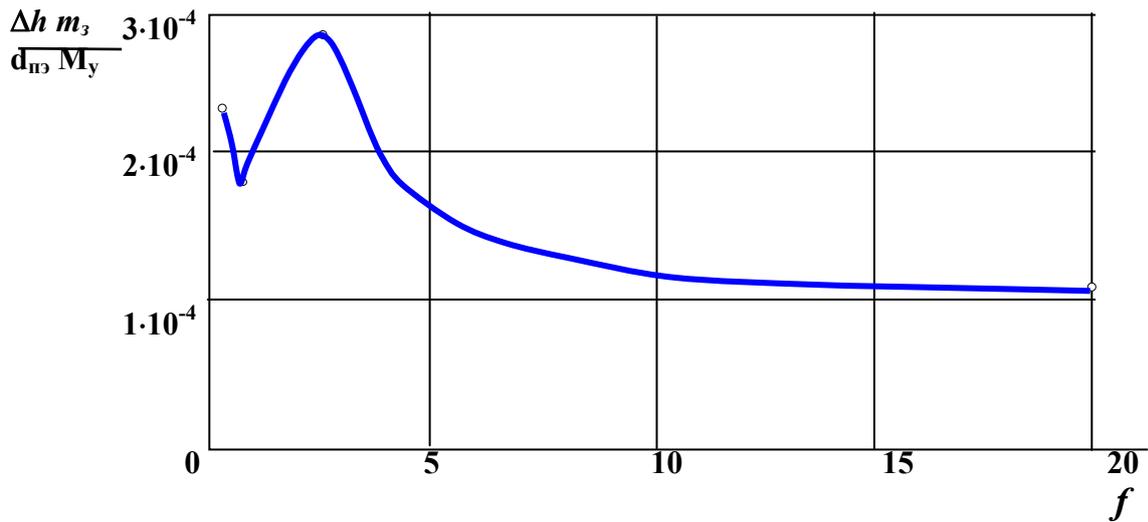


Рис. 5. Безразмерная зависимость отката ПВХ от коэффициента крепости пород по М.М. Протодьяконову

Некоторые эмпирически установленные зависимости приведены на нижеследующих графиках рис. 6 – 7.

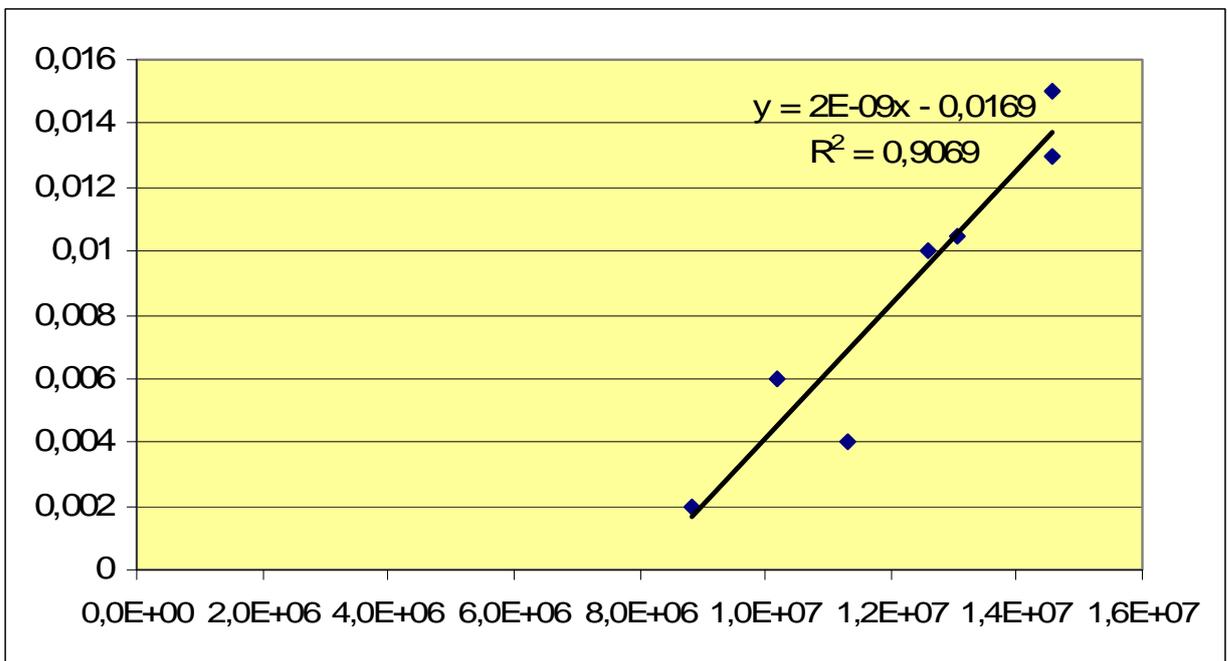


Рис. 6. Зависимость выбитой массы (кг) свинцовой пластины от удельного импульса (кг/м²\*с), передаваемого разрушаемому материалу, для двухслойной преграды (по 2 мм слой)

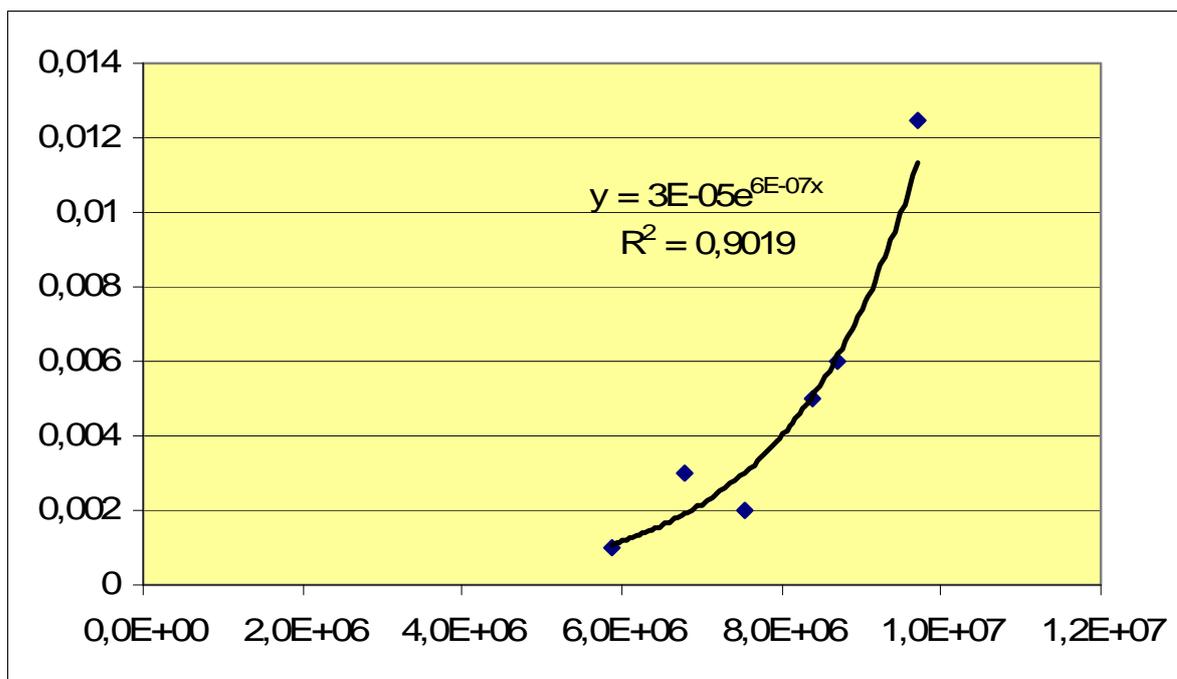


Рис. 7. Зависимость выбитой массы (кг) свинцовой пластины от удельного импульса (кг/м<sup>2</sup>\*с), передаваемого разрушаемому материалу, для трехслойной преграды (по 2 мм слой)

На рис. 8 – 11 приведены усредненные зависимости удельного импульса в средах: «горная порода – воздух», воздух, вода.

Из рис. 8 видно, что при фиксированной массе ПВУ и заряда ВВ зависимость удельного импульса возрастает с увеличением плотности или вязкости окружающей среды и миделя площади отражателя (при фиксированной внутренней поверхности отражателей). Положительный вклад площади отражателя объясняется высокой степенью расширения ПД.

При стремлении площади отражателя к площади заряда ВВ удельный импульс стремится к сближению в различных средах, что объясняется переходом к торцевому воздействию детонационной волны на отражатель.

Из рис. 9 видно, что при фиксированной массе ПВУ и заряда ВВ, а также внутренней поверхности отражателя с изменением его угла полураствора -  $\alpha$ , зависимости удельного импульса имеют разрыв в точке  $\alpha = 45^\circ$ , при этом точками максимума являются для: воды  $\alpha = 0^\circ$  и  $\alpha = 90^\circ$ ; воздуха  $\alpha = 0^\circ$ ; среды «горная порода – воздух»  $\alpha = 90^\circ$ . Данный факт объясняется физико – механическими свойствами окружающей среды и тем, что при  $\alpha = 0^\circ$  обеспечивается максимальное давление по времени, действующее на отражатель при минимальном его миделе (минимальной силе сопротивления), а при  $\alpha = 90^\circ$  - максимальной площадью миделя отражателя при более интенсивном спаде давления ПД, но высокой степенью их расширения.

Влияние на удельный импульс ПВУ в средах  
( ГОРНАЯ ПОРОДА – ВОЗДУХ —▲— ; ВОДА —◆— ; ВОЗДУХ —●— ):

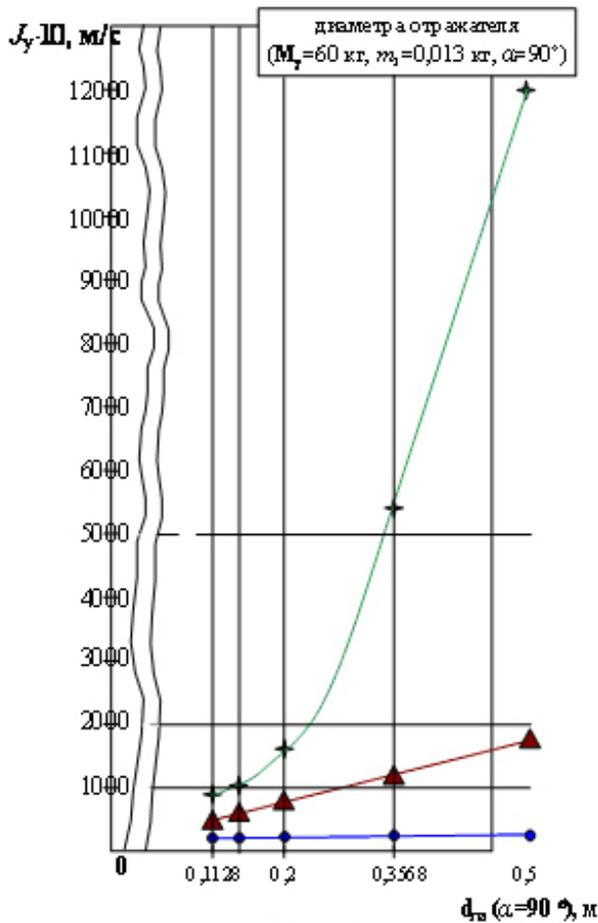


Рис. 8

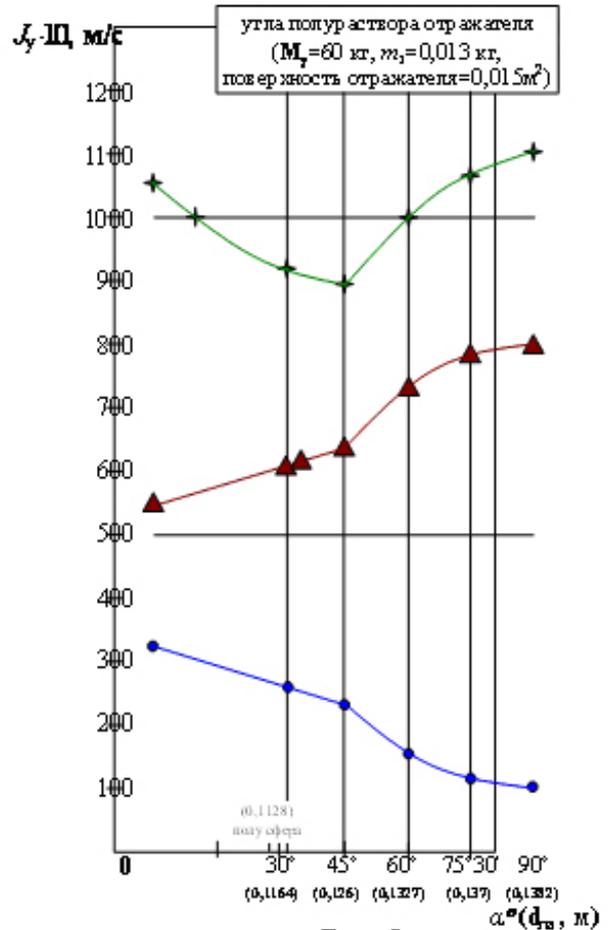


Рис. 9

На показанном ниже рис. 10 видно, что при фиксированной массе ПВУ, площади и геометрии отражателя удельный импульс падает с уменьшением плотности или вязкости окружающей среды и увеличением массы единичного заряда ВВ.

При этом наблюдается сближение удельного импульса для среды «горная порода – воздух» и для воды, т.к. при увеличении массы ВВ увеличивается объем образуемых полостей как в горной породе, так и в воде и, как следствие, более интенсивный выброс ПД в воздух (отражатель ПВУ находится на глубине не более 0,8 м).

Из рис. 11 видно, что при фиксированной площади и геометрии отражателя, массе единичного заряда ВВ существует точка максимума удельного импульса, зависящая от массы ПВУ и его калибра, которая смещается в сторону увеличения массы (инерционных сил) изделия с увеличением плотности или вязкости окружающей среды, что объясняется, с одной стороны, силами сопротивления окружающей среды и инерционности ПВУ, с другой стороны – волновыми процессами ПД, протекающими между отражателем и окружающей средой, и вовлечением этой среды в движение.

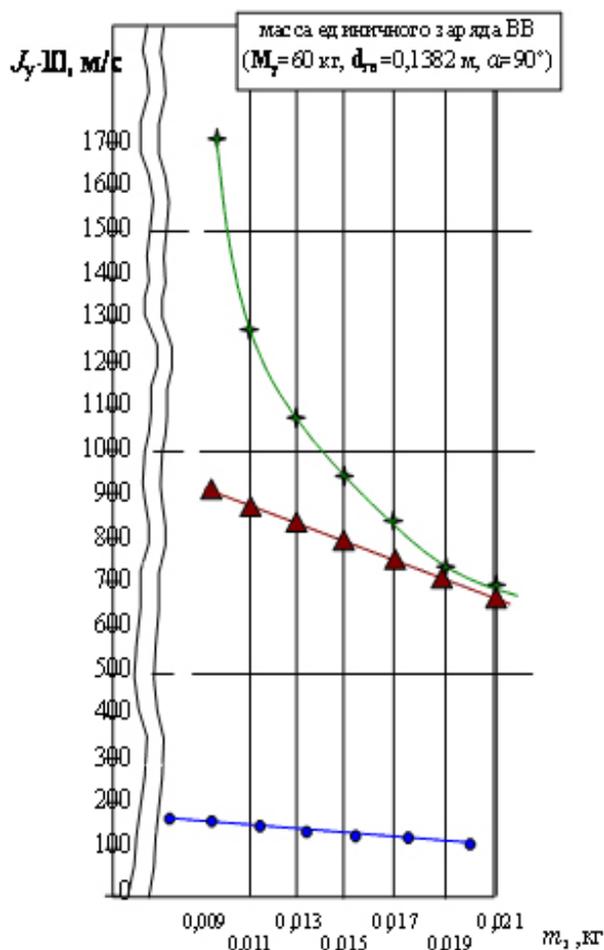


Рис. 10

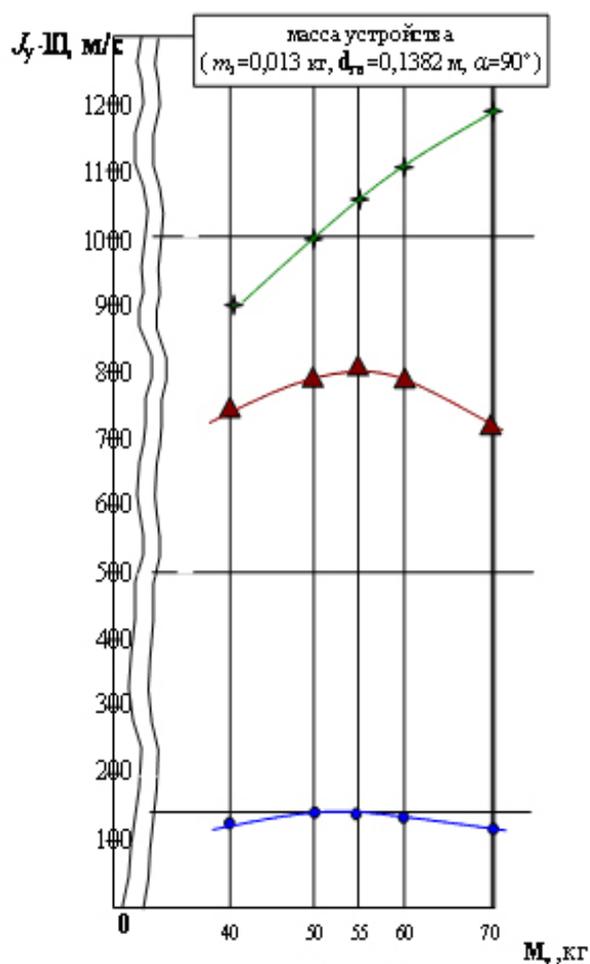


Рис. 11

Наличие указанного максимума является новым нетривиальным экспериментальным фактом, позволяющим проводить оптимизацию геометрии отражателя с целью увеличения эффективности работы устройства.

### 7. Экспериментальные исследования режимов работы ДДУ

Для проверки соответствия результатов расчетов реальной действительности необходимо было провести экспериментальные исследования на натуральных стендах с использованием датчиков фиксирующих перемещения изделия и скоростных фоторегистраторов.

Для большей простоты и наглядности этапов формирования ПД исследования проводились на плоских отражателях. В экспериментах применялся заряд ВВ плотностью  $\rho_B = 1000$  кг/м<sup>3</sup> и массой  $m_B = 0.012$  кг из аммонита 6 ЖВ. Заряд был цилиндрической формы, высота заряда соответствовала его диаметру. Инициирование заряда осуществлялось электрическим детонатором, в состав которого входит ВВ:

- цементированный ТЭН или гексоген массой  $10^{-3}$  кг;
- азид свинца массой  $(3.5 \div 5) \cdot 10^{-4}$  кг.

Электродетонатор вставлялся в заряд ВВ по осевой линии до его геометрического центра. Заряд ВВ и часть электродетонатора располагались внутри формованной тонкостенной алюминиевой обложки общей массой  $1.6 \cdot 10^{-3}$  кг, изготовленной из фольги ТУ 48-21-1032-76.

Для оценки сходимости результатов расчета и эксперимента динамики движения ДДУ с отражателем использовался полунатурный экспериментальный стенд «Пульсар-1», схема которого представлена на Рис. 14. Стенд «Пульсар-1» предназначался для имитации работы ДДУ за один рабочий цикл не только в воздухе, но и в воде, а также при старте с твердой поверхности. В комплект стенда входило следующее оборудование:

- измерительное оборудование для анализа перемещения имитатора ДДУ;
- набор отражателей различной геометрии и калибра, в т.ч. диаметр плоских отражателей изменялся от 113 до 533 мм;
- набор грузов для изменения массы имитатора ДДУ, в данной серии экспериментов масса изделия соответствовала 60 кг.

Изучались стадии истечения в воздух ПД с поверхности неподвижного отражателя, заряд располагался на верхней поверхности плоского отражателя диаметром 437 мм. Стадии расширения ПД фиксировались на фотопленку при помощи скоростного фоторегистратора.

Исследования показали, что результаты расчета располагаются ниже экспериментальной кривой (следует заметить, что в расчете, инициирование заряда производилось вдоль нижней плоскости ВВ). Кроме того, проведенные ранее авторами исследования по изучению конструкций зарядов ВВ и способов их инициирования показали, что данные характеристики оказывают существенное влияние на динамику метания тел. Поэтому была проведена вторая серия исследований, направленных на изучение адекватности картины расширения ПД на поверхности отражателя для реального способа инициирования заряда ВВ и гипотетических – принятых для численных расчетов.

Результаты фотосъемок показали, что до момента времени  $10^{-5}$  с ПД расширяются как полусфера. Далее расширение ПД по форме напоминает эллиптический сегмент. Скорость расширения ПД вдоль отражателя происходит быстрее, чем перпендикулярно его поверхности. Зона пониженного давления развивается в форме гриба, ножка которого находится на поверхности отражателя. В момент времени  $1.8 \cdot 10^{-5}$  с зона пониженного давления на поверхности отражателя замыкается зоной повышенного давления, при этом наблюдается пик повышенного давления в центре отражателя.

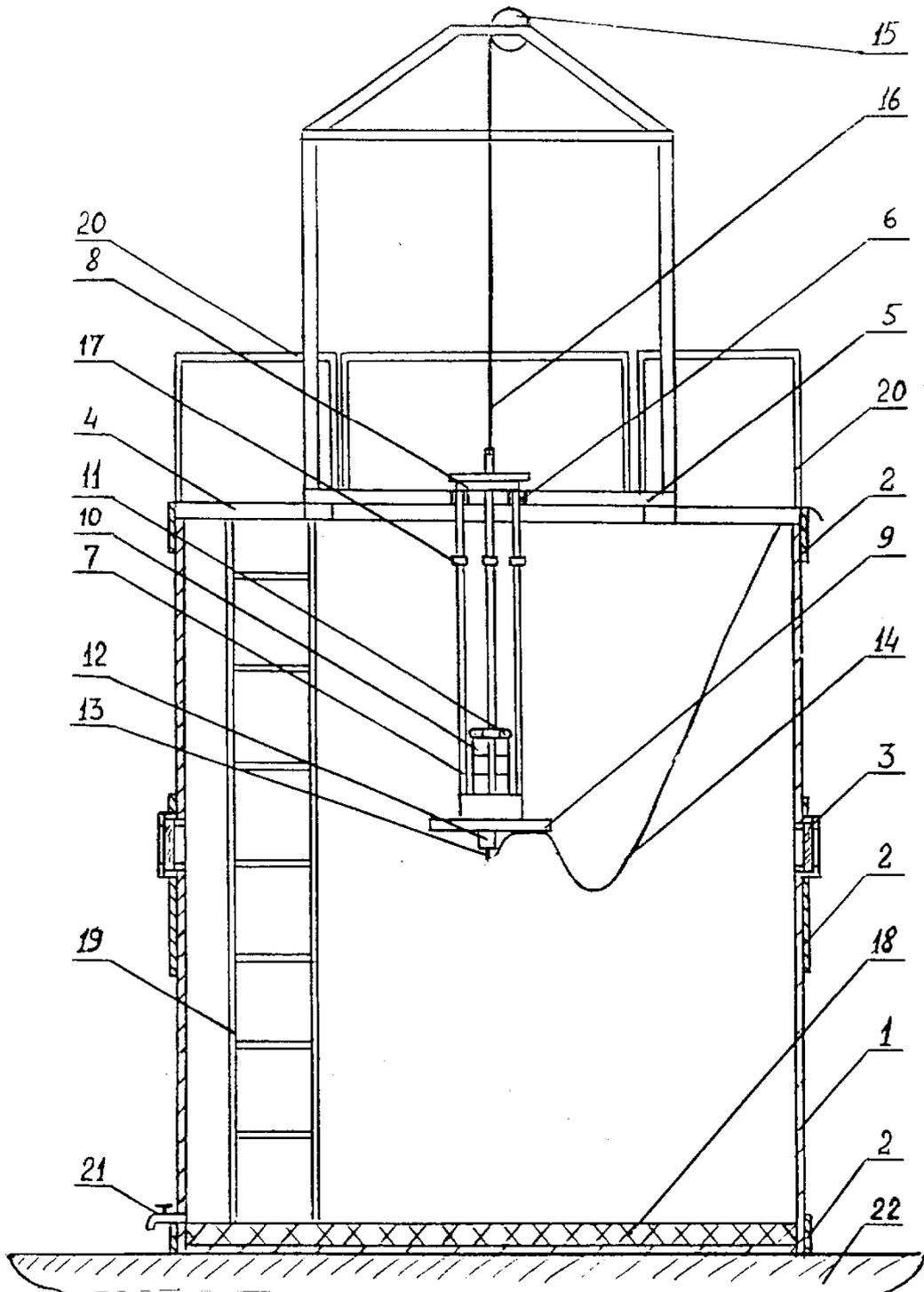


Рис. 14. Устройство экспериментального стенда «Пульсар-1»:

1 - корпус взрывной камеры; 2 - пояс жесткости; 3 - окна; 4 - перекрытие;  
 5 - рама уровня; 6 - подшипники скольжения; 7 - направляющие имитатора  
 ДДУ; 8 - амортизатор; 9 - отражатель; 10 - навесные грузы; 11 - замок;  
 12 - заряд ВВ; 13 - детонатор электрический; 14 - кабель электрический;  
 15 - лебедка; 16 - трос; 17 - датчик отката; 18 - демпфер; 19 - лестница;  
 20 - ограждения; 21 - сливной кран; 22 - фундамент.

Исследования по расширению ПД на поверхности отражателя показали, что экспериментальные и численные характеристики имеют не только качественное, но и количественное совпадение (в пределах разброса экспериментальных данных и адекватности численной модели). В дальнейшем предстоит работа по уточнению математической модели с целью приближения ее к реальной постановке задачи.

### **Литература**

1. Субботин В.И., Орлов Ю.Н., Есьман В.И., Соловьев В.О., Суслин В.М., Христофоров Б.Д. Экспериментальные и численные исследования воздействия рентгеновского излучения на жидкометаллическую стенку камеры реактора ИТС. / Препринт ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, 2007, № 90. – 20 с.
2. Чуразов М.Д., Аксенов А.Г., Забродина Е.А. Зажигание термоядерных мишеней пучком тяжелых ионов. // ВАНТ, Сер. Математические модели физических процессов, Вып. 1, №.20. 2001.
3. Medin S.A. et al. Reactor Chamber and Balance-of-Plant Characteristics for Fast-Ignition Heavy-Ion Fusion Power Plant // Fusion Science and Technology, 2003. V.43. No.3. P.437-446.
4. Медин С.А., Орлов Ю.Н. Концепция камеры реактора ИТС на тяжелых ионах. // ВАНТ, сер. Термоядерный синтез, 2005. Вып. 2. С. 3-14.
5. Медин С.А., Орлов Ю.Н., Суслин В.М. Расчет динамики испарения защитной пленки первой стенки камеры реактора ИТС / Препринт ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, № 62, 2004. – 28 с.
6. Соловьев В.О., Христофоров Б.Д. Моделирование механического воздействия импульсного рентгеновского излучения на стенки камер ядерных реакторов. /
7. Самарский А.А., Попов Ю.П. Разностные методы решения задач газовой динамики. М.: Наука, 1980.
8. Физика взрыва. Ред. Орленко Л.П. Том 2. М. Физматлит. 2004. 656 с.