

ТУЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

На правах рукописи

МИХАЙЛОВ Александр Валериевич

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СОПРЯЖЕННЫХ
ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ, ПРОТЕКАЮЩИХ ПРИ
РЕАЛИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИИ РАСНАРЯЖЕНИЯ
БОЕПРИПАСОВ НАПРАВЛЕННЫМ ПОТОКОМ ЛЕДЯНЫХ
УДАРНИКОВ.**

Специальность 05.13.16 –
Применение вычислительной техники, математического моделирования
и математических методов в научных исследованиях
(в области технических наук).

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук.

Тула – 2000.

Работа выполнена в Тульском государственном университете.

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
А.Н. Чуков

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Н. М. Качурин
кандидат физико-математических наук
Л.А. Ковалев.

Ведущее предприятие: ГУП «ГНПП «СПЛАВ», г.Тула.

Защита диссертации состоится «_____» _____ 2000 г. в _____
час.

на заседании диссертационного Совета К 063.47.10 Тульского государственного университета. (300600, Тула, ГСП, проспект им. Ленина, 92, 9–101).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Тульского государственного университета.

Автореферат разослан «_____» _____ 2000 года.

Ученый секретарь диссертационного
Совета, к.т.н., доцент

Ковешников В.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы.

В настоящее время, интенсивное развитие средств вычислительной техники, алгоритмов и методов математической формализации сложных физических процессов создает объективные предпосылки к совершенствованию традиционных подходов к решению ряда задач математического моделирования. Одним из наиболее сложных, трудноформализуемых физических процессов является процесс передачи значительного потенциала энергии в различных контактных системах разрушения массивов природных или искусственно созданных материалов. В настоящее время, наиболее перспективным практическим приложением использования контактных методов разрушения в различных отраслях промышленности является реализация ряда технологических способов расснаряжения морально и физически устаревших боеприпасов (БП).

Учитывая широкий ассортимент БП, подлежащих расснаряжению следует отметить, что проблема поиска наиболее универсального способа расснаряжения, обеспечивающего высокую производительность процесса при гарантированной взрывобезопасности, на сегодняшний день, не получила однозначного решения и именно поэтому является актуальной.

Относительно новым, перспективным вариантом гидродинамического способа расснаряжения БП является технология, основанная на использовании, в качестве разрушающей среды, направленного потока ледяных ударников, формируемых при низкотемпературном охлаждении дисперсных продуктов распада турбулентной водяной струи в среде газообразного хладагента. Выдача практических рекомендаций по назначению рациональных режимов реализации данного варианта гидродинамического способа не представляется возможной без детального рассмотрения всей совокупности физических явлений и процессов на основе использования методов математического моделирования.

В соответствии с вышеизложенным представляется актуальной цель диссертационной работы.

Цель работы.

Теоретическое обоснование возможности применения водоледяной технологии расснаряжения боеприпасов на основе результатов реализации разработанного математического аппарата сопряженных гидродинамических процессов.

Задачи исследований.

Достижение поставленной цели обеспечивается при решении следующих задач:

1. Разработка математической модели и проведение исследований процесса движения турбулентного потока жидкости по каналу струеформирующего насадка с учетом влияния технологического несовершенства последнего.

2. Разработка математической модели сопряженных гидродинамических процессов траекторного движения и распада турбулентной струи с краевыми условиями, учитывающими неравномерность профиля выходной скорости потока и характеристики предыстории возмущенного течения.

3. Проведение исследований характеристик процесса установившегося двухфазного течения с кристаллизацией дискретных фракций жидкой фазы в неизотермическом потоке газообразного хладагента в осесимметричном канале на основе предлагаемой модификации системы определяющих уравнений с учетом нелинейности теплофизических характеристик компонентов смеси.

4. Разработка комплексной математической модели процесса взаимодействия твердофазного ударника с ВВ сложной реологической структуры с учетом процессов тепло– и массопереноса в локальной области контакта и оценка реакционной теплоустойчивости широко диапазона энергоносителей к механическому нагружению фазоизменяющимся ударником.

5. Разработка детерминированной методики оценки параметров производительности предлагаемого способа расснаряжения боеприпасов с известными вариантами и, на основе проведенных исследований, выдача практических рекомендаций по назначению рациональных режимов реализации данной технологии.

Автор защищает.

1. Комплексный математический аппарат расчета и результаты исследований влияния различных факторов на параметры процесса расснаряжения боеприпасов направленным потоком ледяных ударников, который включает:

– математическую модель стесненного и свободного траекторного движения турбулентного потока несжимаемой жидкости с учетом влияния погрешностей изготовления и износа канала сопла струеформирующего насадка;

– усовершенствованную математическую модель установившегося течения двухфазной среды в осесимметричном канале с учетом фазовых переходов жидкой фазы и нелинейности теплофизических свойств контактирующих элементов смеси;

– математическую модель процесса взаимодействия твердофазного ударника со взрывчатым снаряжением (ВС) боеприпаса;

– методику оценки чувствительности ВВ к динамическому нагружению ледяным ударником с учетом изменения фазового состояния последнего;

– детерминированную методику определения параметров производительности процесса расснаряжения боеприпасов направленным потоком ледяных ударников.

2. Практические рекомендации по назначению рациональных режи-

мов процесса расснаряжения боеприпасов с помощью предлагаемой технологии.

Общая методика исследований.

Математическое моделирование процессов, протекающих при реализации рассматриваемой схемы процесса расснаряжения боеприпасов осуществлялось посредством численного решения систем дифференциальных и алгебраических уравнений. Исключением в работе является решение уравнения потенциала (уравнения Лапласа) в эллиптической системе координат, проводимое аналитически с использованием классического метода разделения переменных (метода Фурье). В других случаях (моделирование турбулентных стесненных турбулентных потоков и свободных струй, двухфазных течений, процессов тепло– и массопереноса в контактной системе «ледяной ударник – ВВ» и др.) использовались конечноразностные схемы второго порядка точности, при необходимости с использованием процедуры сглаживания решений в областях высоких значений аргументов.

Комплексность разработанной математической модели сопряженных процессов обеспечивалась при использовании в качестве начальных условий на границе расчетной области рассматриваемого элементарного процесса МНК–аппроксимаций краевых значений параметра, полученных при численном рассмотрении и исследовании предыдущего элементарного процесса.

Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций, полученных в результате проведенных исследований, подтверждены детальным сопоставлением расчетных результатов с данными экспериментов, заимствованными из литературных источников.

Автор выражает глубокую благодарность докторанту кафедры «Газовая динамика» Сладкову Валерию Юрьевичу и доктору технических наук, профессору кафедры «Физика» ТулГУ Лагун Ирине Марсельевне за ценные замечания и рекомендации при подготовке материалов диссертационной работы.

Научная новизна.

1. Разработана математическая модель движения турбулентного потока жидкости по сложнопрофилированному осесимметричному каналу с учетом влияния энергетических характеристик и корреляционных масштабов турбулентности на усредненные динамические параметры течения.

2. Предложен вариант формулировки краевых условий решения системы дифференциальных уравнений Рейнольдса развития свободного траекторного движения турбулентной струи с учетом неравномерности профиля выходной скорости потока и начальных распределений турбулентных пульсаций на уровне выходного сечения струеформирующего сопла.

3. Предложена модификация системы уравнений установившегося движения двухфазного потока с кристаллизацией дискретного компонента с учетом нелинейности теплофизических свойств контактирующих сред и

эффекта теплового изменения объема фракций переменного фазового состояния.

4. Разработана математическая модель процесса внедрения твердофазного ударника в ВВ с учетом процессов тепло– и массопереноса в контактной системе.

5. Разработана физически обоснованная модель оценки чувствительности ВВ к динамическому нагружению твердофазным ударником с учетом влияния жидкой и конденсированной низкотемпературной фазы последнего на интенсивность контактного разогрева энергоносителя.

Практическая ценность и реализация результатов работы.

Практическая ценность работы заключается:

- в обеспечении возможности уточненного расчета динамических параметров высокоскоростного потока в канале и на траектории с учетом факторов технологического несовершенства струеформирующего сопла и в выдаче теоретически обоснованных практических рекомендаций по назначению необходимого качества изготовления последнего;

- в обеспечении возможности расчета температурных и динамических параметров процесса двухфазного с фазовыми превращениями, позволяющего определять необходимые условия формирования твердофазной рабочей среды;

- в обеспечении возможности детерминированного расчета термодинамических и силовых параметров процесса внедрения твердофазного ударника в ВВ, позволяющего определять рациональные, по энергоемкости разрушения и безопасности, условия взаимодействия;

- в выдаче практических рекомендаций по назначению рациональных режимов реализации технологии расснаряжения боеприпасов направленным потоком ледяных ударников.

Созданный пакет прикладных программ для ПЭВМ и результаты проведенных теоретических исследований внедрены на ГУП «ГНПП «СПЛАВ» (г.Тула). Отдельные положения диссертации включены в разделы спецкурсов кафедры «Газовая динамика» ТулГУ, а также использованы при выполнении курсовых и дипломных проектов студентами специальности 171400 – Газодинамические импульсные устройства.

Апробация работы.

Результаты исследований, полученные при выполнении диссертационной работы докладывались и обсуждались:

- на научно-технической конференции «Итоги развития механики в Туле» (Тула, 1998 г.);

- на XXXV научно-технической конференции профессорско-преподавательского состава ТулГУ (Тула, 1999 г.);

- на региональной научно-технической конференции «Проблемы проектирования и производства систем и комплексов» (Тула, 1999 г.);

Результаты законченной диссертационной работы докладывались на заседании кафедры «Газовая динамика» ТулГУ и на расширенном заседа-

нии кафедры ««Автоматизированные информационные и управляющие системы»» ТулГУ.

По материалам диссертации опубликовано 11 научных работ, получен 1 патент РФ на изобретение.

Структура и объем работы.

Диссертация состоит из введения, пяти разделов, основных выводов, заключения и списка использованных источников. Работа содержит _____ страниц машинописного текста, включая _____ рисунков, _____ таблиц, список использованных источников из 164 наименований и 1 приложение.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ.

Во введении содержится обоснование актуальности темы диссертации, формулируется научная новизна и практическая значимость, определяется цель работы и задачи исследований, реферировается содержание основных разделов диссертации.

В **первом разделе** диссертации приведен обзор научно-технических работ и патентных публикаций по вопросам, связанным с разработкой и совершенствованием методов расснаряжения боеприпасов.

Проведенный анализ различных технологических схем процесса расснаряжения позволил определить конструктивный облик оборудования, реализующего процесс фрагментации ВВ в камере боеприпаса направленным потоком ледяных ударников и разработать общую схему комплексной математической модели протекающих процессов.

Основной акцент в разделе сделан на подробном рассмотрении известных математических моделей и расчетных методик параметров физических процессов, протекающих при реализации водоледяной технологии расснаряжения БП. На основе анализа отмеченных недостатков и перечня неучтенных факторов существующего математического описания были сформулированы задачи исследований, определившие общую концепцию построения комплексной математической модели сопряженных гидродинамических процессов.

Во **втором разделе** диссертации представлена разработанная математическая модель сопряженных процессов формирования, траекторного движения и распада турбулентной струи вязкой несжимаемой жидкости, истекающей из технологически несовершенного канала струеформирующего сопла.

В данном разделе приведены результаты теоретических исследований по оценке влияния конструктивных параметров и технологических особенностей изготовления струеформирующего сопла на динамические характеристики течения и количественные показатели турбулентности макроструктуры потока.

В качестве исходной системы уравнений использовались интегральные зависимости, выражающие законы сохранения массы и энергии с привлечением необходимой эмпирической информации по определению ко-

коэффициента Кориолиса в уравнении сохранения энергии.

С использованием описанной выше системы интегральных уравнений законов сохранения энергии и массы, дополненной алгебраическими соотношениями теории пристенных течений были определены осевые распределения средней скорости $U_{CP}(x)$ и полного давления потока $P(x)$, распределения скорости $u^*(x)$ и сдвиговых напряжений трения $\tau^*(x)$, а также распределения толщины вытеснения $\delta(x)$ и значений градиентов $U_{,x}$ и $P_{,x}$, что позволило определить аргументы уравнений полуэмпирической теории турбулентного пограничного слоя.

Для расчета параметров распределения осевой скорости в поперечном (радиальном) направлении $U(y,x)$ была использована модель двухслойного течения с ламинарным вязким подслоем наиболее адекватно описывающая высокоскоростные течения несжимаемой жидкости в осесимметричном канале. Неравномерность данного профиля скорости оценивалась интегрально с использованием следующего выражения для коэффициента неравномерности, приведенного в работе А.С.Гиневского.

В таблице 1 приведены результаты сравнительного анализа значений средней скорости истечения, рассчитанных по предлагаемой модели U_{II2} с результатами эксперимента $U_{Э}$ и данными известной расчетной методики U_{III} .

Таблица 1.
Результаты сравнительного анализа расчетных значений выходной скорости с экспериментом по предлагаемой и известной моделям.

$P \cdot 10^6$, Па	40	60	80	100
$U_{Э}$, м/с	234,34	292,52	337,78	377,65
U_{III} (по изв. модели), м/с	260	322	372	416
U_{II2} (по предл. модели), м/с	252,42	309,25	357,16	399,16

Из приведенного сравнения следует, что учет неравномерности профиля скорости в разработанной модели позволил уточнить данные известной расчетной модели на 30–47 % по отношению средних квадратических отклонений. С использованием уравнений теории изотропной однородной турбулентности в пограничном слое были определены значения искомых распределений параметров турбулентности в выходном сечении канала.

На рис. 1 и 2 приведены графические зависимости распределения энергии турбулентности потока k и скорости ее диссипации ε в выходном сечении канала со следующими геометрическими характеристиками: длина канала $L_K=0,012$ м; угол конусности конфузора $\alpha=15^\circ$; длина цилиндрического участка $L_{Ц}=0,3L_K$ при различных магистральном давлении в системе подачи жидкости.

Таким образом, созданный математический аппарат позволил уточнить зависимости динамических характеристик и параметров макроструктуры течения от магистрального давления жидкости и конструктивных особенностей изготовления насадка.

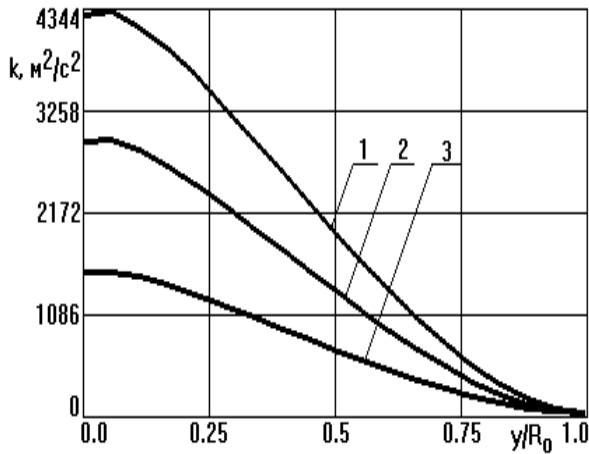


Рис.1. Графические зависимости распределений энергии турбулентности в выходном сечении канала: 1– $P=120 \cdot 10^6$ Па; 2– $P=80 \cdot 10^6$ Па; 3– $P=40 \cdot 10^6$ Па.

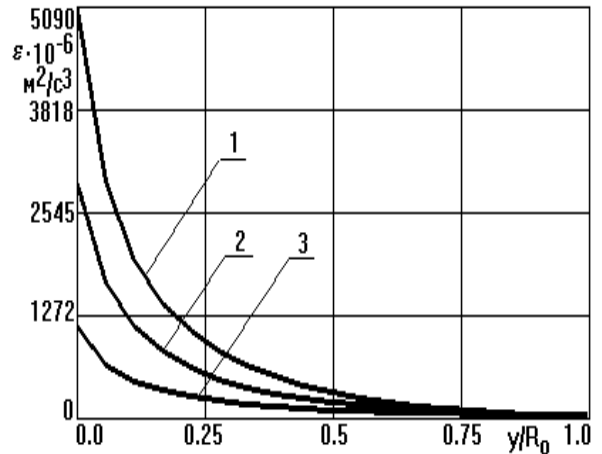


Рис.2. Графические зависимости распределений скорости диссипации энергии турбулентности в выходном сечении канала: 1– $P=120 \cdot 10^6$ Па; 2– $P=80 \cdot 10^6$ Па; 3– $P=40 \cdot 10^6$ Па.

На втором этапе построения комплексной математической модели сопряженных гидродинамических процессов, протекающих при движении турбулентных потоков была проведена оценка влияния начальных условий на параметры эволюции турбулентной свободной струи, истекающей из шероховатого осесимметричного канала с учетом неравномерности профиля выходной скорости последней.

В основу данного фрагмента модели было положено численное интегрирование дифференциальных уравнений турбулентного пограничного слоя, замыкаемых системой релаксационных стационарных уравнений переноса кинетической энергии турбулентности и скорости ее диссипации (уравнений $k\varepsilon$ -модели турбулентности Колмогорова–Прандтля).

Разработанный вариант математической модели траекторного движения турбулентной струи жидкости позволяет не только получать значения параметров потока, истекающего из гидравлически гладкого канала струеформирующего насадка, но и адекватно прогнозировать отклик динамических параметров течения к изменению состояния и качества обработки внутренней поверхности канала с учетом предыстории течения.

С целью проверки математической модели траекторного движения струи жидкости на адекватность проведено сравнение расчетных значений скорости и турбулентных напряжений на заданном удалении от среза канала сопла с экспериментальными данными, заимствованными из литературных источников. Среднее квадратическое отклонение расчетных значений составило 6,49% и 12,85% соответственно, что свидетельствует о приемлемой точности и удовлетворительном качестве созданного математического аппарата.

На рис.3 и 4 приведены графические зависимости изменения осевого и поперечного распределений продольной скорости потока $U(x,y)$ при заданных начальных условиях для различной степени шероховатости по-

верхности канала струеформирующего насадка Δ .

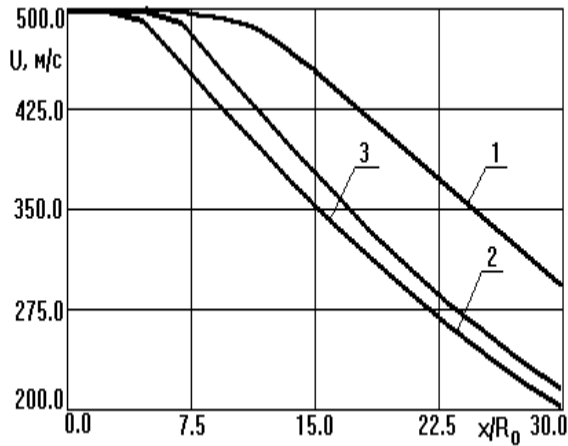


Рис.3. Графические зависимости распределений осевой скорости по длине потока: 1- $\Delta=1\cdot 10^{-5}$ м, 2 - $\Delta=6\cdot 10^{-5}$ м, 3 - $\Delta=1\cdot 10^{-4}$ м.

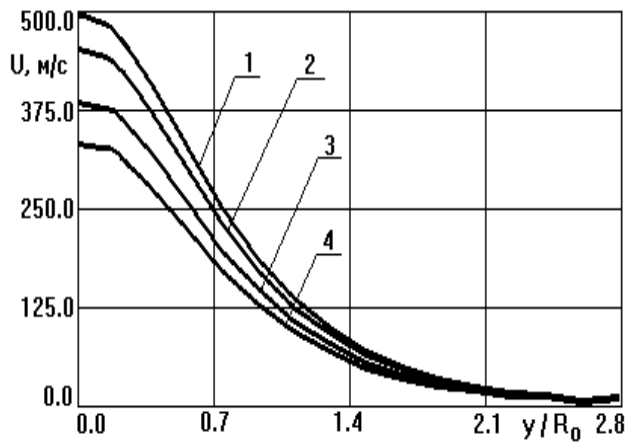


Рис.4. Графические зависимости распределений осевой скорости по радиусу струи: 1- $\Delta=2\cdot 10^{-6}$ м, 2- $\Delta=1\cdot 10^{-5}$ м, 3- $\Delta=6\cdot 10^{-5}$ м, 4- $\Delta=1\cdot 10^{-4}$ м

Проведенные расчеты и анализ полученных зависимостей распределений показал, что наибольшее влияние коэффициента неравномерности скорости потока β , обусловленное наличием шероховатости канала наблюдается на малом расстоянии от среза сопла струеформирующего насадка, составляющее $3\dots 13R_0$, то есть на начальном участке турбулентной струи.

В разделе также было рассмотрено влияние эллиптичности профиля сечения на параметры истекающей струи жидкости.

В качестве базовой методики расчета параметров течения несжимаемой жидкости из эллиптического канала была использована модель, предложенная в 1956 году Ю.Ф.Дитякиным, в основу которой положено аналитическое решение уравнения Лапласа для потенциала скоростей потока.

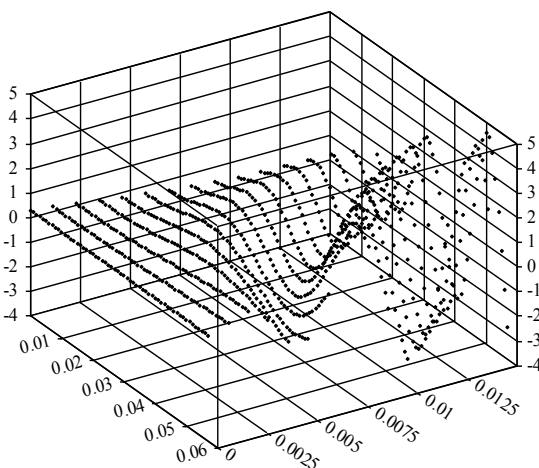


Рис.5. Графическая зависимость распределений $\xi(t,x)$ при $\Delta=60\cdot 10^{-6}$ м, $\varepsilon=0,75$.

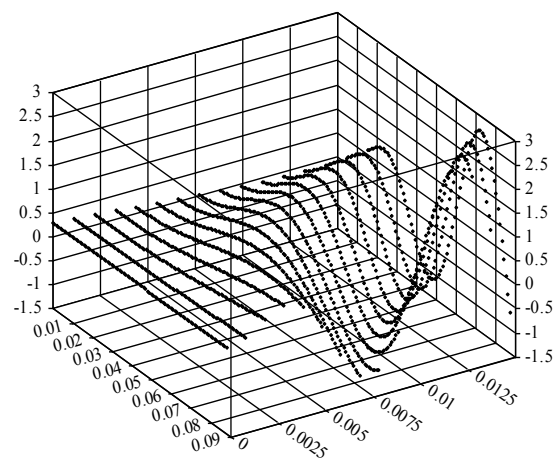


Рис. 6 . Графическая зависимость распределений $\xi(t,x)$ при $\Delta=60\cdot 10^{-6}$ м, $\varepsilon=0,99$.

В данной модели был проведен учет влияния температуры жидкости

на ее тепломеханические константы и осевого распределения скорости струи, истекающей из цилиндрического сопла, с учетом шероховатости последнего, что позволило оценить совместное влияние эллиптичности и шероховатости на параметры потока, в частности, на компактность струи, выраженную через максимальную высоту подъема периферийных молей жидкости при сложном колебательно-поступательном движении (рис. 5,6).

В результате проведенных исследований было получено, что эллиптичность профиля канала струеформирующего сопла существенно влияет на компактность формируемого струйного потока. Так, с увеличением коэффициента эллиптичности на 25 %, высота подъема периферийных молей жидкости увеличивается на 60–78 % в зависимости от сочетания прочих начальных условий (шероховатости, скорости истечения, коэффициента неравномерности профиля выходной скорости и т.д.).

Результаты теоретической оценки влияния технологического несовершенства канала струеформирующего сопла (его шероховатость и эллиптичность) на кинематические и гидродинамические характеристики, истекающей струи, полученные в предыдущих параграфах раздела позволили провести исследования процесса инерционного распада (диспергирования) последней с учетом выше названных факторов. В основу разработанной математической модели было положено использование известного математического аппарата описания параметров диспергирования струи с помощью методов теории размерности и подобия. В общем виде, для характеристик распада турбулентной струи справедливо следующее выражение:

$$f_i = f_i[A_i, (We_1^{n_1} We_2^{n_2}), (Re_1^{m_1} Re_2^{m_2}), Lp^K Z^L]; \quad (1)$$

где $f_i^T = \{\bar{U}, L_C, \alpha_C, \bar{r}_i, \xi, \beta, \nu\}$ – транспонированная матрица значений характеристик распада струи;

\bar{U} – среднее значение осевой скорости потока;

L_C, α_C – длина сплошного участка струи и корневой угол распыла;

\bar{r}_i – среднее медианное значение размера капель в распыле;

ξ – амплитуда поперечных возмущений струи при формировании;

β, ν – волновое число и комплексная частота колебаний молей струи;

$A, n_1, n_2, m_1, m_2, K, L$ – эмпирические константы процесса.

Значения безразмерных критериев Вебера We , Рейнольдса Re , Лапласа Lp и Онезорге Z в предлагаемом случае определялись как:

$$We(x, y) = \frac{2\rho W(x, y)y}{\sigma}; \quad Re(x, y) = \frac{2\rho W(x, y)y}{\mu_1}; \quad (2)$$

$$Lp(x, y) = \frac{Re^2(x, y)}{We(x, y)}; \quad Z(y) = \frac{\mu_1^2}{\rho y \sigma}; \quad (3)$$

где $W(x, y)$ – модуль суммарного вектора скорости потока в точке с

координатами x, y ;

ρ, σ, μ_l – соответственно плотность, коэффициент поверхностного натяжения и динамической вязкости жидкости.

Значения длины нераспавшегося (сплошного) участка струи L_c и среднее медианное значение радиуса капель r_i определялись с использованием полуэмпирических зависимостей, предложенных А.Хайнелайном и Л.В.Кулагиным с использованием введенных ранее предположений о взаимной корреляции характеристик сплошного и дисперсного течения ($U_m \rightarrow U(x, y)$, $We \rightarrow We(x, y)$ и т.д.).

На основе созданного математического аппарата были получены зависимости искомых характеристик инерционного распада турбулентной струи, что обеспечило возможность моделирования процессов движения полидисперсного капельного потока в различных средах, в том числе, в спутном потоке газообразного хладагента.

В **третьем разделе** диссертации разработана модифицированная математическая модель движения двухфазного потока в осесимметричном коническом канале с малым углом конусности с кристаллизацией жидкой дискретной фазы и учетом зависимости теплофизических свойств компонентов смеси от температуры.

В основу разработанной модели был положен известный математический аппарат, предложенный в работах У.Г.Пирумова, описывающий одномерное установившееся течение сплошной (газовой) и дискретной (жидкой) фазы, включающий уравнения сохранения массового расхода, количества движения и полной энергии контактирующих фаз, дополненный дифференциальными соотношениями энергии межфазного теплообмена и кинетического уравнения процесса равновесной кристаллизации дискретных фракций жидкости в газообразном хладагенте.

Для учета зависимости теплофизических свойств компонентов смеси от температуры, в частности, значений удельной теплоемкости газовой C_p и i -ой дискретной C_i фазы была предложена следующая модификация уравнения полной энергии с учетом изменяющегося теплового баланса в системе в результате освобождения скрытой энергии (теплоты) кристаллизации:

$$\begin{aligned} & (1 - \alpha) \cdot \left[T \frac{dC_p}{dx} + C_p \frac{dT}{dx} + V \frac{dV}{dx} \right] + \alpha \cdot \left[\left(\sum_{i=1}^N C_i g_i \frac{dT_i}{dx} \right) + \right. \\ & \left. + \left(\sum_{i=1}^N g_i T_i \frac{dC_i}{dx} \right) \right] - 3\alpha q \cdot \sum_{i=1}^N \xi_i^2 \frac{d\xi_i}{dx} + \alpha \cdot \sum_{i=1}^N V_i \frac{dV_i}{dx} = \\ & = T_0 \cdot \left[(1 - \alpha) \frac{dC_p}{dx} + \alpha \cdot \frac{dC_i}{dx} \right]; \end{aligned} \quad (4)$$

$$\frac{dC_p}{dx} = \frac{dC_p}{dT} \cdot \frac{dT}{dx}; \quad \frac{dC_i}{dx} = \frac{dC_i}{dT_i} \cdot \frac{dT_i}{dx}; \quad (5)$$

где α, g_i – общая массовая доля фракций и доля i -ых (по массе) фракций в суммарной массе дискретной фазы в потоке;

T, V, T_i, V_i – значения температуры и скорости газа и i -ой частицы дискретной фазы соответственно;

q, ξ_i – скрытая теплота изменения фазового состояния вещества дискретной фракции (для воды, $q=3 \cdot 10^5$ Дж/кг) и текущее значение степени кристаллизации i -ой фракции;

T_0 – критическая температура торможения газа [$^{\circ}\text{C}$].

Проведенный сравнительный анализ результатов реализации математической модели с учетом (4) и (5) с данными известной расчетной методики и экспериментом показал, удовлетворительную работоспособность данной модификации. Среднее квадратическое отклонение расчетных данных от экспериментальных значений составило 5,4 %.

На рис.7 и 8 приведены графические зависимости распределений скорости и температуры хладагента по длине канала, а на рис. 9 и 10 – распределений скорости и температуры дискретной фазы.

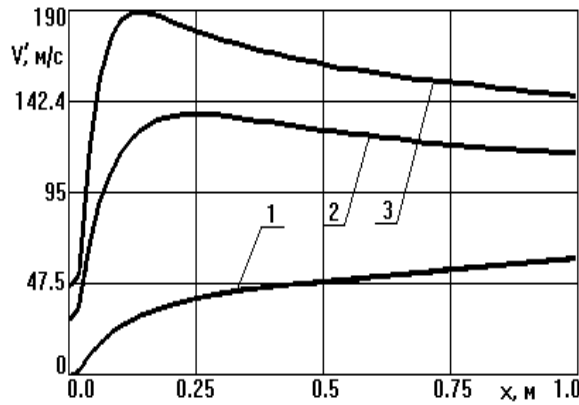


Рис.7. Графические зависимости избыточной скорости газовой фазы:
(Начальная скорость дискретной фазы $V_i^0=300$ м/с; температура – $T_i^0=8^{\circ}\text{C}$)
1– $P_0=10^6$ Па; 2– $P_0=3 \cdot 10^6$ Па; 3– $P_0=5 \cdot 10^6$ Па.

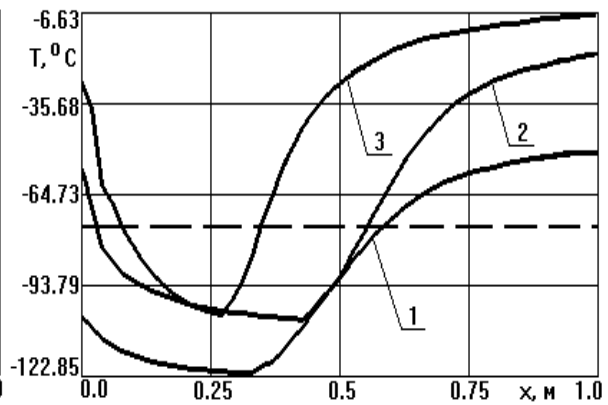


Рис.8. Графические зависимости температуры газовой фазы:
1– $P_0=10^6$ Па; 2– $P_0=3 \cdot 10^6$ Па; 3– $P_0=5 \cdot 10^6$ Па.

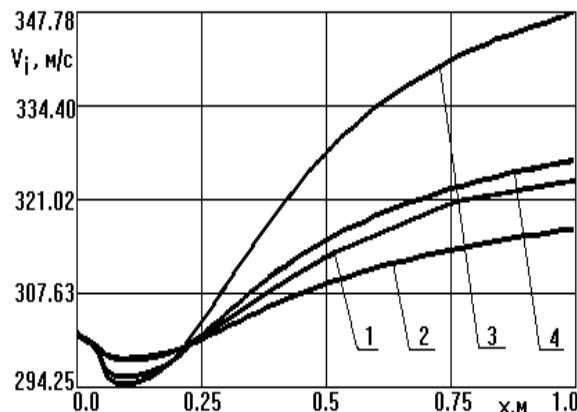


Рис.9. Графические зависимости скорости частиц дискретной фазы:
1– $T_i^0=8^{\circ}\text{C}$; $r_i=0,292 \cdot 10^{-3}$ м;
2– $T_i^0=8^{\circ}\text{C}$; $r_i=0,739 \cdot 10^{-3}$ м;
3– $T_i^0=6^{\circ}\text{C}$; $r_i=0,292 \cdot 10^{-3}$ м;
4– $T_i^0=6^{\circ}\text{C}$; $r_i=0,739 \cdot 10^{-3}$ м.

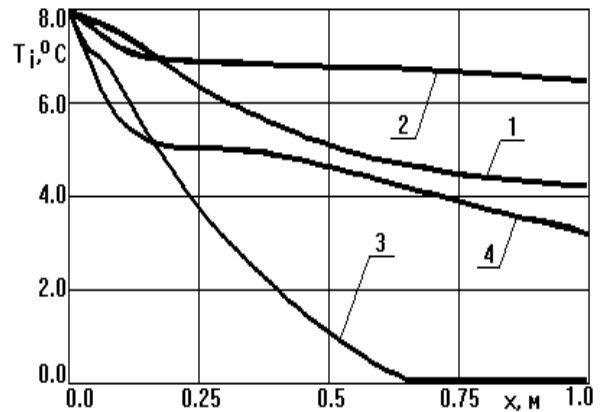


Рис.10. Графические зависимости температуры частиц дискретной фазы:
1– $V_i^0=250$ м/с; $r_i=0,292 \cdot 10^{-3}$ м;
2– $V_i^0=250$ м/с; $r_i=0,739 \cdot 10^{-3}$ м;
3– $V_i^0=450$ м/с; $r_i=0,292 \cdot 10^{-3}$ м;
4– $V_i^0=450$ м/с; $r_i=0,739 \cdot 10^{-3}$ м.

С использованием предложенного математического аппарата были определены характеристики одномерных распределений температур и скоростей контактирующих фаз, а также динамические характеристики процесса кристаллизации жидких компонентов смеси, что позволило количественно оценить влияние различных факторов на параметры двухфазного течения.

Для оценки потенциала разрушающей способности сформированного потока, в модель была введена следующая целевая функция:

$$g_i(X_1, X_2) = \frac{1}{2} \bar{\rho}_i \bar{V}_i^2(H) \cdot \sigma_C^{CЖ}(T_{02})^{-1}; \quad (6)$$

с дополнительным условием по степени кристаллизации частиц: $\bar{\xi}_i < 0,5$,

где X_1 – матрица-строка факторов непрерывного регулирования (P_0, T_i^0, V_i^0)

X_2 – матрица-строка факторов дискретного регулирования, определяющие геометрические характеристики элементов канала сопла: длина сопла $L_{сф}$, радиусы входного R_1 и выходного R_2 сечений раструба сопла с углом конусности γ и отношение радиусов наружного и внутреннего сечения коаксиального канала подвода газа $\varphi = R_H/R_B < 1$.

$\bar{\rho}_i$ – осредненная плотность потока частиц дискретной фазы;

$\bar{V}_i(H)$ – значение средней скорости потока на удалении H от выходного сечения канала R_2 . Значение H определялось в виде суммы расстояний от выходного сечения канала до лицевой поверхности заряда и глубины камеры утилизируемого боеприпаса; $\sigma_C^{CЖ}(T_{02})$ – предел прочности ВВ на сжатие при заданной начальной температуре.

В результате проведенных исследований влияния начальных условий на функцию $g(X_1, X_2)$ были определены значения ее локальных экстремумов, определяющих рациональные значения параметров системы формирования потока твердофазных ударников.

В **четвертом разделе** диссертации разработана и численно реализована комплексная математическая модель процессов, протекающих при ударном взаимодействии твердофазного ударника со взрывчатым веществом.

В разделе приведены основные положения разработки и реализации созданного математического аппарата, описывающего этапы взаимодействия и внедрения ледяного индентора в упруго-пластическую инертную среду. В основу предложенного математического описания положено численное интегрирование уравнения движения ударника вида:

$$m(t) \dot{V} = -\frac{1}{2} C_X \rho_C(T_2) S(t) V^2(t) - \sigma_{CЖ}^C(T_2) S(t) - F_{TP}(T_2, V); \quad (7)$$

где $m(t)$ – текущие значения массы твердофазного ударника с учетом

наличия обратного фазового перехода на контактной поверхности $S(t)$;

$$m(t) = m(t - \tau) - \int_0^{\varphi_1} \frac{Q_1(t, \varphi)}{q + C_V^H \Delta T_1} d\varphi; \quad (8)$$

τ – шаг интегрирования по времени;

$h(t)$ – текущее значение глубины внедрения ударника;

$Q_1(t, \varphi)$ – мгновенное распределение тепловой энергии, генерируемой работой сил сопротивления на поверхности ударника;

$q, C_V^H \Delta T_1$ – удельная теплота фазового перехода и удельные затраты тепловой энергии на разогрев контактного слоя ударника от начальной температуры до критической (температуры плавления);

C_X – коэффициент лобового сопротивления ударника. В расчетах, $C_X=0,5$;

$\rho_C(T_2), \sigma_{СЖ}^C(T_2)$ – зависимости значений плотности и предела прочности ВВ на сжатие от температуры контактного разогрева, представляемые в виде нелинейных аппроксимаций экспериментальных данных.

Сила сопротивления трения ударника определялась с учетом изменения фазового состояния контактной поверхности последнего:

$$F_{TP}(t, \varphi) = f_V(T_1) \sigma_r(t, \varphi) S(t, \varphi) H \left[dA(t, \varphi) - \{q + C_V^H \Delta T_1\} dm(t, \varphi) \right] + 2\mu_1 \frac{V(t, \varphi)}{\gamma(t, \varphi)} S(t, \varphi) H \left[\{q + C_V^H \Delta T_1\} dm(t, \varphi) - dA(t, \varphi) \right]; \quad (9)$$

где $f_V(T_1)$ – динамический коэффициент трения в системе "лед–ВВ";

$\sigma_r(t, \varphi)$ – мгновенное распределение значений радиальных напряжений на поверхности контакта ударника с ВВ;

$\{q + C_V^H \Delta T_1\} dm(t, \varphi)$ – значение тепловой энергии, необходимой для перевода элементарной массы твердой фазы ударника в жидкое состояние;

$\mu_1, \gamma(t, \varphi)$ – коэффициент динамической вязкости жидкой фазы и угловое распределение толщины жидкого (вязкого) слоя на поверхности твердофазного ударника.

На втором этапе формирования математической модели были проведены исследования разрушающей способности твердофазного ударника, воздействующего по ВВ.

Общими условиями решения системы уравнений, описывающей процесс ударного нагружения ВВ твердофазным индентором являются:

при $t=0$ ($\varphi=0$): $h(t)=0$; $V(t)=V_0$; $m(t)=m_0$; $T_i(t)=T_{0i}$; $\varepsilon(t)=0$;

при $t=t_{ПР}$, $V(t_{ПР})=0$.

В рассматриваемом случае взаимодействия фазоизменяющегося ударника с ВВ дополнительно были введены следующие краевые условия:

при $t=t_{ПР}$, $m(t_{ПР})=0$ – переход материала твердофазного ударника в

жидкое состояние;

при $t=t_{\text{ПР}}, t_{\text{УВ}} < t_{\text{ПР}}, t_{\text{УВ}} = 2R_0/c_{\text{И}}(T_{01}), c_{\text{И}}(T_{01})$ – скорость продольной волны сжатия в материале ударника; – условие волнового разрушения ударника;

при $t=0, \rho_{\text{И}}V_0^2 > \sigma_{\text{И}}^{\text{СЖ}}(T_{01}), \rho_{\text{И}}, \sigma_{\text{И}}^{\text{СЖ}}(T_{01})$ – плотность и предел прочности на сжатие материала ударника; – условие контактного разрушения ударника.

Проведенный сравнительный анализ результатов моделирования с данными известной эмпирической модели и теоретической методики позволил сформулировать следующие выводы:

– созданный математический аппарат, описывающий процесс внедрения фазоизменяющегося ударника в ВВ с учетом влияния факторов тепло– и массопереноса на контактной поверхности может быть признан работоспособным на уровне среднего квадратического отклонения от экспериментальных данных порядка 7–8 %;

– учет влияния тепловых эффектов в разработанной математической модели позволил уточнить результаты моделирования на 4–5% при сравнении с экспериментом и известной теоретической методикой.

В качестве объектов исследований в разработанной модели были определены два типа ВВ (ВВ1 и ВВ2) с существенно различными физико-механическими и теплофизическими свойствами.

На рис. 11 представлены графические зависимости изменения глубины внедрения ударника в ВВ 2 при фиксированных начальных условиях взаимодействия с учетом (кривые 2) и без учета (кривые 1) температурного фактора, а на рис. 12 – графические зависимости профиля "линзы" откола для различных начальных условий взаимодействия двух типов ВВ.

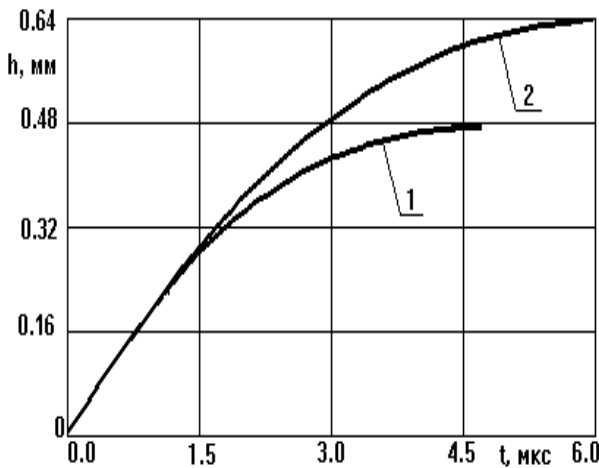


Рис.11. Графические зависимости изменения глубины внедрения при проникании ударника в ВВ2.

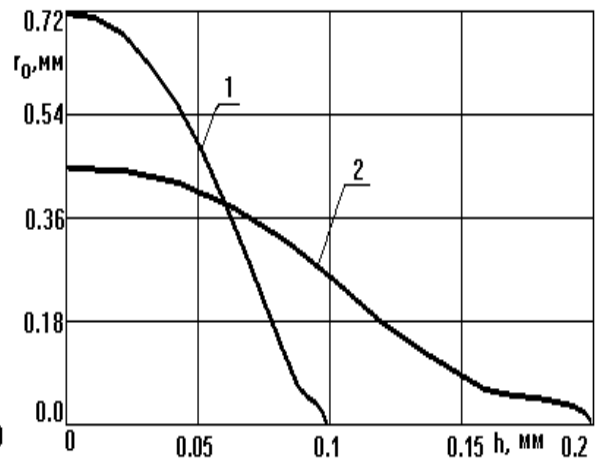


Рис.12. Графические зависимости профиля лицевого откола $R_0=1 \cdot 10^{-4}$ м 1–ВВ1; 2–ВВ2.

В результате математической обработки результатов исследований влияния начальных условий на глубину внедрения ударника и объем лицевого откола были построены аппроксимационные зависимости $\delta h(R_0, V_0)$ и $\delta W(R_0, V_0)$, вид и коэффициенты которых приведены в работе.

Одной из основных проблем, возникающих при утилизации боеприпасов является обеспечение безопасности проводимых работ. При выполнении операции расснаряжения изделий, во взрывчатом снаряжении последних не должно возникать не только детонационных процессов, но и локальных очагов возгорания.

Процесс ударно-температурного нагружения ВВ описывался совместным решением следующей системы уравнений:

– двумерного уравнения теплопроводности сферического ледяного ударника с начальными условиями: $t=0, T_1(0, r, \varphi)=T_{01}; S(0, \varphi)=0; R(0, \varphi)=R_0$. и граничными условиями: $r=0, \frac{\partial T_1(t, \varphi)}{\partial r} = 0; r= R(t), T_1(t, R, \varphi)=F_1(t, \varphi)H[\varphi^K - \varphi] + T_{01}H[\varphi - \varphi^K]$; где φ^K – угловая координата крайней точки проекции контактной поверхности; $F_1(t, \varphi)$ – распределение температуры на контактной поверхности ударника при внедрении в ВВ в момент времени t .

На основе решения уравнения с заданными краевыми условиями были определены распределения температуры жидкой и твердой фазы ударника; динамические кривые потери массы твердой фазы и функции массового прихода жидкой среды в полость каверны в ВВ".

– системы дифференциальных уравнений термодинамики рабочего тела (жидкости) переменной массы с замыкающим уравнением состояния в форме Ван-дер-Ваальса.

Термодинамическое состояние жидкости в полости каверны изменялось дискретно в течении текущего шага интегрирования по времени τ при действии следующих взаимосвязанных процессов: 1) разогрев ударника и ВВ при контактном взаимодействии; 2) приход дискретной массы жидкости от ударника при обратном фазовом переходе (плавлении) с определенным объемом и начальной температурой; 3) изменение параметров состояния жидкости в полости каверны при гидростатическом сжатии; 4) осреднение температуры жидкой фазы и контактной поверхности ВВ; 5) расход жидкости из радиального зазора, созданного ударником при отколе ВВ.

Интенсивность объемного разогрева ВВ с удовлетворительной точностью определялась при решении неоднородного дифференциального уравнения теплопроводности с нелинейными источниками внутреннего саморазогрева вещества-энергоносителя и уравнения интенсивности его "выгорания".

Решение данного линейного уравнения теплопроводности с нелинейным источником реакции внутреннего саморазогрева осуществлялось с использованием метода дискретного счета, предложенного учеными Лос-Аламосского Университета (США).

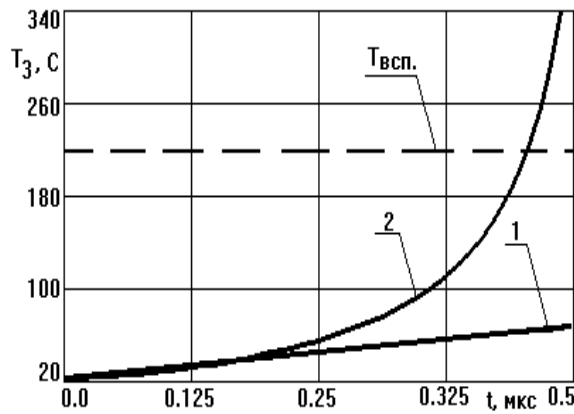


Рис.13. Графические зависимости изменения температуры ВВ (ВВ3) $R_0=0,2$ мм: 1– $V_0=700$ м/с; 2– $V_0=1250$ м/с.

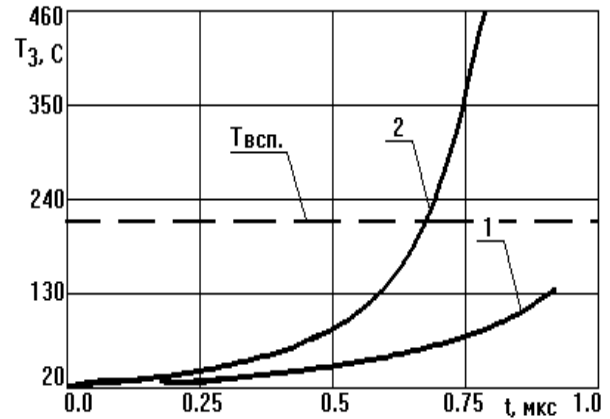


Рис.14. Графические зависимости изменения температуры ВВ (ВВ3) $R_0=0,4$ мм: 1– $V_0=700$ м/с; 2– $V_0=1250$ м/с.

В результате решения данных уравнений были определены зависимости интенсивности разогрева контактного слоя различных типов бризантных ВВ для широкого диапазона начальных условий нагружения фазоизменяющимся ударником (рис.13 и 14), что позволило оценить критические условия взаимодействия ударника с энергоносителем и определить безопасные условия реализации водоледяной технологии расснаряжения боеприпасов.

Таким образом, в результате реализации созданного математического аппарата описания процессов, протекающих при взаимодействии фазоизменяющегося ударника со взрывчатым веществом были получены важные характеристики, определяющие физические параметры разрушения различных типов энергоносителей и их чувствительность к ударному разогреву с учетом конвективных процессов переноса в системе.

В **пятом разделе** диссертации приведена разработанная интегральная методика оценки характеристик производительности процесса расснаряжения БП направленным потоком ледяных ударников.

Накопление "выработанного" объема снаряжения осуществлялось дискретным суммированием конечно малых объемов лицевого откола δW глубиной δH , определяющих массовые параметры фрагмента снаряжения, удаленного при заданных начальных условиях нагружения:

$$\delta W(x) = f_1[V_0(x), R_0]; \quad \delta H(x) = f_2[V_0(x), R_0]; \quad (10)$$

В рамках допущения о монодисперсности потока дискретной фазы, воздействующей непосредственно по заряду энергоносителя боеприпаса, значение массы твердой фазы (в пересчете на жидкость) *достаточной* для разрушения цилиндрического слоя снаряжения радиусом $r_K(X)$ и толщиной $\delta H[V_0(x), R_0]$ определится как:

$$\delta m_{min}^{ж}(x) = \frac{4}{3} \cdot \rho_{ж} \frac{\pi^2 r_K^2(x) \delta H[V_0(x), R_0] R_0^3}{\delta W[V_0(x), R_0]}; \quad (11)$$

где $\rho_{ж}$ – плотность фракций жидкого состояния (кг/м^3).

Значение $r_K(x)$ определялось с использованием кусочно-линейной аппроксимации профиля разрывного заряда боеприпаса.

В реальном процессе, при движении дисперсного жидкого потока, формируемого при распаде турбулентной струи, значение массы, затрачиваемой на разрушение ВВ неизбежно окажется существенно выше величины, определенной по зависимости (*) ввиду наличия потерь. В разработанной методике учитывались:

- потери формируемой массы твердой фазы, обусловленные неполной кристаллизацией частиц в потоке хладагента с коэффициентом компенсации k_1 ;
- потери массы первоначально жидкой фазы, "выпавшей" на стенках канала при движении с коэффициентом компенсации k_2 .

С учетом зависимости для определения массы жидкости, *необходимой* для разрушения элементарного объема снаряжения:

$$\delta m_{max}^{ж}(x) = k_1 k_2 \delta m_{min}^{ж}(x); \quad (12)$$

малый интервал времени разрушения определялся:

$$\delta T_p(x) = \frac{4}{\pi \mu \rho_{ж} V_{ж} d_c^2} \delta m_{max}^{ж}(x); \quad (13)$$

Полное время расснаряжения боеприпаса определялось суммированием малых дискретных значений $\delta T_p(x)$ по длине заряда X_3 .

В качестве объектов исследования были определены изделия ЗОФ25 и ЗУОФ-6 со штатным снаряжением ВВ1 и ВВ2.

Предложенный вариант методики определения параметров производительности позволяет оценить значения производительности и энергоемкости процесса расснаряжения при заданных условиях течения жидкости и газа, геометрии заряда и типа ВВ.

Основные выводы и результаты работы.

В диссертационной работе была решена важная научно-практическая задача, связанная с разработкой комплексного математического аппарата сопряженных гидродинамических процессов, протекающих при реализации перспективного способа расснаряжения морально и физически устаревших боеприпасов.

На основе численной реализации приведенной математической модели были сформулированы следующие выводы:

1. Учет влияния турбулентного пограничного слоя и неравномерности профиля течения жидкости по каналу струеформирующего насадка позволяет уточнить значения динамических характеристик течения, рассчитанных по известным численным методикам, на 3–6 % по среднему квадратическому отклонению от экспериментальных данных.

2. Предложенная модификация системы уравнений установившегося двухфазного течения с кристаллизацией дискретного компонента при учете нелинейности теплофизических свойств контактирующих сред и температурного расширения фракций дискретной фазы обеспечила возможность

рассмотрения процессов генерации и преобразования энергии системы на дифференциальном уровне, что позволило качественно уточнить физическую картину течения бинарной газожидкостной смеси с твердой фазой, в частности характер распределений динамических и температурных параметров фаз.

3. Учет влияния процессов тепло- и массопереноса в контактирующих средах, реализующихся при высокоскоростном взаимодействии ледяного ударника с ВВ приводит к качественному и количественному уточнению значений глубины внедрения ударника на 5–6 % по среднему квадратическому отклонению.

4. Построена и численно реализована физически обоснованная методика оценки чувствительности ВВ к динамическому нагружению твердофазным ударником с учетом влияния жидкой и конденсированной фазы последнего на интенсивность контактного разогрева энергоносителя позволившая определить критические условия нагружения ВВ и сформулировать рекомендации по назначению безопасных режимов реализации технологии расснаряжения боеприпасов. На основе проведенных исследований определены значения коэффициентов запаса устойчивости различных типов ВВ к градиентному температурному нагружению, которые соответственно составили: для однокомпонентных бризантных энергоносителей 0,16–0,34 и для двухосновных ракетных топлив 0,07–0,16.

5. Предлагаемый технологический способ расснаряжения боеприпасов направленным потоком ледяных ударников позволяет повысить производительность процесса дефрагментации ВВ на 8–12 % по сравнению с классическим гидродинамическим способом; уровень надежности и безопасности в среднем на 35–39 % по сравнению с гидроабразивным способом и понизить на 25–38 % уровень водонасыщенности извлеченного энергоносителя.

Основное содержание диссертации отражено в публикациях:

Прогнозирование параметров движения диспергирующих жидких струй высокого давления при различных начальных и граничных условиях./ Жабин А.Б., Михайлов А.В., Пушкарев А.Е., Чуков А.Н. // “Технология и механизация горных работ”. - Москва: Изд-во АГН, 1996. - С. 60–63.

Некоторые перспективные технологии резания материалов./ Бреннер В.А., Чуков А.Н., Головин К.А., Шевалдин А.Г., Сазонов Д.Ю., Михайлов А.В. // Сборник тезисов докладов II Международной конференции по проблемам экологии и безопасности жизнедеятельности. - Тула.: ТулГУ, 1998. - С. 143.

Теоретический анализ влияния начальных условий на кинематические и гидродинамические параметры потока жидкости через профилированные насадки. / Антонова Е.В., Михайлов А.В., Сладков В.Ю., Чуков А.Н.// Известия ТулГУ. Серия “Машиностроение”, № 4. - Тула.: ТулГУ, 1998. - С. 8–11.

Теоретический анализ влияния начальных условий на кинематические

и термодинамические параметры струи при движении в среде хладагента./ Антонова Е.В., Михайлов А.В., Сладков В.Ю., Чуков А.Н.// Прикладные задачи механики и газодинамики. -Тула.: ТулГУ, 1997. - С. 27–32.

Михайлов А.В., Сладков В.Ю. Теоретические исследования турбулентной структуры потока в свободной струе. // Известия ТулГУ. Серия “Проблемы специального машиностроения”. Выпуск 2. Материалы региональной научно-технической конференции “Проблемы проектирования и производства систем и комплексов”.- Тула.: ТулГУ, 1999. - С. 82–85.

Михайлов А.В., Сладков В.Ю. Исследование влияния качества обработки внутренней поверхности сопла на движение турбулентной струи несжимаемой жидкости. // Известия ТулГУ. Серия “Проблемы специального машиностроения”. Выпуск 2. Материалы региональной научно-технической конференции “Проблемы проектирования и производства систем и комплексов”.- Тула.: ТулГУ, 1999. - С. 112–116.

Михайлов А.В., Чуков А.Н. К вопросу решения задачи Стефана для случая осесимметричного обтекаемого тела. // Известия ТулГУ. Серия “Физика”. Выпуск 2. - Тула.: ТулГУ, 1999. - С. 158–163.

Михайлов А.В., Лагун И.М., Чуков А.Н. Особенности моделирования процессов кристаллизации сфероподобных тел в условиях неизотермического охлаждения. // Сборник тезисов докладов научно-технической конференции “Итоги развития механики в Туле”. - Тула.: ТулГУ, 1998. - С. 109.

Михайлов А.В., Сладков В.Ю., Чуков А.Н. Моделирование процесса криогенного разрушения материала с ограниченными ресурсами пластичности. // Известия ТулГУ. Серия “Физика”. Выпуск 2. - Тула.: ТулГУ, 1999. - С. 145–150.

Михайлов А.В. Моделирование процесса проникания фазоизменяющегося ударника во взрывчатое вещество. // Известия ТулГУ. Серия “Проблемы специального машиностроения”. Выпуск 2. Материалы региональной научно-технической конференции “Проблемы проектирования и производства систем и комплексов”.- Тула.: ТулГУ, 1999. - С. 137–141.

Михайлов А.В., Сладков В.Ю., Чуков А.Н. Оценка разрушающей способности твердофазного индентора с учетом тепло- и массопереноса на поверхности контакта с преградой.// “Оборонная техника”, № 3–4, 1999. - С. 26-29.

Патент № 2122206. Способ определения чувствительности заряда ВВ к динамическому воздействию струей жидкости. / Антипов В.В., Антонова Е.В., Бреннер В.А., Воротилин М.С., Думчев С.М., Гилик Г.Б., Калюжный Г.В., Михайлов А.В., Пушкарев А.Е., Сладков В.Ю., Чуков А.Н. (РФ). – 1998 г.