



**НАУЧНАЯ СЕССИЯ
НИЯУ МИФИ – 2017
ПО НАПРАВЛЕНИЮ
ИННОВАЦИОННЫЕ ЯДЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ,
посвященная памяти В.Ф. Куропатенко**

**Сборник научных трудов
всероссийской конференции**

19-22 декабря 2017 г.

Москва-Снежинск

УДК 621.039 + 658.51 + 681.5

НЗ4

НАУЧНАЯ СЕССИЯ НИЯУ МИФИ-2017 по направлению «Инновационные ядерные технологии». Сборник научных трудов всероссийской научно-практической конференции, посвященной памяти В.Ф.Куропатенко. 19-22 декабря 2017 г., Снежинск. М.: НИЯУ МИФИ; Снежинск: СФТИ НИЯУ МИФИ, 2017. 156с.

Настоящая книга является сборником научных трудов, представленных в рамках всероссийской научно-практической конференции по направлению «Инновационные ядерные технологии» ежегодной Научной сессии Национального исследовательского ядерного университета МИФИ на базе Снежинского физико-технического института НИЯУ МИФИ. Заседания по данному направлению проводятся в СФТИ НИЯУ МИФИ совместно с градообразующим предприятием Снежинска ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. акад. Е.И. Забабахина» с 2011 года.

ПРЕДСЕДАТЕЛЬ:

Симоненко В.А. - зам. научного руководителя ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. акад. Е.И. Забабахина», д.ф-м.н., профессор

СОПРЕДСЕДАТЕЛИ:

Водолага Б.К. - зам. научного руководителя ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. акад. Е.И. Забабахина», д.ф-м.н.

Линник О.В. - руководитель СФТИ НИЯУ МИФИ, к.и.н., доцент

ISBN 978-5-7262-2439-8

© Снежинский физико-технический институт НИЯУ МИФИ, 2017

СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
Агеева Ю.А., Баутин С.П. ТРОПИЧЕСКИЕ ЦИКЛОНЫ, СТАТИСТИКА, МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ	9
Антюфеев В.А., Орлов Ю.А., Орлова Н.Ю. ВЛИЯНИЕ STL ФОРМАТА 3D МОДЕЛИ НА ТОЧНОСТЬ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ДЕТАЛИ ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ	10
Антюфеева С.А., Пильщиков А.А., Орлова Н.Ю. ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКОГО ПОРОШКА НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ РОССИЙСКОГО ПРОИЗВОДСТВА ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ИЗДЕЛИЙ ПО ТЕХНОЛОГИИ СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО СПЛАВЛЕНИЯ	13
Апороски А.В., Пешков Д.А., Садыков Н.Р., Юдина Н.В. УСИЛЕНИЕ И РАСПАД ТЕРАГЕРЦОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В РЕЗОНАНСНОЙ ДВУХУРОВНЕВОЙ СРЕДЕ НА ОСНОВЕ МАССИВА НЕВЗАИМОДЕЙСТВУЮЩИХ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ВЫРОВНЕННЫХ НАНОТРУБОК	16
Баутин С.П. МОДЕЛЬ В.Ф. КУРОПАТЕНКО МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ СРЕД И ЕЕ НЕКОТОРЫЕ МАТЕМАТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА	18
Безгодов Е.В., Пасюков С.Д., Никифоров М.В., Попов И.А., Федюшкин В.Н. ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИИ ОБРАЗЦА РЕКОМБИНАТОРА НА ПРОЧНОЙ УСТАНОВКЕ РФЯЦ-ВНИИТФ	20
Белоногов М.Н. РАСЧЕТНО-ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НЕЙТРОННО- ФИЗИЧЕСКИХ И ТЕПЛОГИДРАВЛИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК БЛОЧНОГО РАСПЛАВНОСОЛЕВОГО РЕАКТОРА	21
Белоногова Е.А., Бочкарева А.А., Макеева И.Р., Томилов Ю.А., Щенникова Е.М., Шереметьева У.Ф. РАЗРАБОТКА ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ АППАРАТА РАСТВОРЕНИЯ МОДУЛЯ ПЕРЕРАБОТКИ И ПЕЧИ КАРБОТЕРМИЧЕСКОГО СИНТЕЗА ДЛЯ МОДУЛЯ ФАБРИКАЦИИ/РЕФАБРИКАЦИИ	23
Беляев П.Е., Лавренюк И.В., Безгодов Е.В. ЧИСЛЕННАЯ МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ НОРМАЛЬНОЙ СКОРОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЛАМИНАРНОГО ПЛАМЕНИ В ВОДОРОДОСОДЕРЖАЩИХ СОСТАВАХ	25
Бочкарева А.А., Шульц О.В., Макеева И.Р., Пешкичев И.В., Пугачёв В.Ю., Дубосарский В.Г., Кузнецова О.В., Дарина Л.Н. ВОЗМОЖНОСТИ ПРОГРАММНОГО МОДУЛЯ TEDU И ЕГО ПРИМЕНЕНИЕ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ПРОЦЕССОВ ЗЯТЦ	27

	Стр.
Зотеев Н.К., Крушный В.В. МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ МИКРОКОНТРОЛЛЕРОВ	49
Зуев Ю.С., Карманов Н.И. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПЕРЕХОДА ГОРЕНИЯ ВО ВЗРЫВ В ВЗРЫВЧАТОМ ВЕЩЕСТВЕ НА ОСНОВЕ ОКТОГЕНА	50
Ивойлов Д.О., Коробейников К.А. КОНСТРУКЦИЯ И РАСЧЕТ ВСТРОЕННОЙ ПРЕДОХРАНИТЕЛЬНОЙ МУФТЫ	51
Кабанов С.Ю., Орлова Н. Ю. ИССЛЕДОВАНИЕ МАГНИТНОЙ ВОСПРИИМЧИВОСТИ И МОДЕРНИЗАЦИЯ УПРАВЛЕНИЯ МАГНИТОМЕТРОМ НА ОСНОВЕ КЕРАМИКИ УВСО	52
Казачинский А.О. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРИДОННОЙ ЧАСТИ ЗАКРУТКИ ГАЗА КАК РЕШЕНИЕ СПЕЦИАЛЬНОЙ ЗАДАЧИ КОШИ	54
Карпенко Ю.В., Орлова Н.Ю. ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ СПЛАВА ЭП648 И СТАЛИ 12Х18Н10Т, ИЗГОТОВЛЕННЫХ ПО 3-D ТЕХНОЛОГИИ	55
Кирьянова А.С., Дерябин С.Л. ТРЕХМЕРНАЯ ЗАДАЧА О РАСПАДЕ СПЕЦИАЛЬНОГО РАЗРЫВА В УСЛОВИЯХ ДЕЙСТВИЯ СИЛЫ ТЯЖЕСТИ	57
Ковалев Ю.М. УРАВНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ В ЗАДАЧАХ МЕХАНИКИ СПЛОШНЫХ СРЕД	58
Козлов П.А. , Баутин С.П. МОДЕЛИРОВАНИЕ С ПРИБЛИЖЕНИЕМ ТРИГОНОМЕТРИЧЕСКИМИ РЯДАМИ ТЕЧЕНИЯ ВЯЗКОГО ТЕПЛОПРОВОДНОГО ГАЗА И ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РАСПАРАЛЛЕЛИВАНИЯ	60
Конников А.В., Тананаев И.Г. ПОИСК ТЯЖЕЛЫХ РАЗБАВИТЕЛЕЙ ТЬФ В ПРОЦЕССЕ ЭКСТРАКЦИОННОГО ИЗВЛЕЧЕНИЯ УРАНА	61
Красильников А.В. Куропатенко В.Ф. О РАСПРОСТРАНЕНИИ СИЛЬНОГО РАЗРЫВА В ДВУХКОМПОНЕНТНОЙ СМЕСИ	62
Крутова И. Ю. МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРЕХМЕРНЫХ ТЕЧЕНИЙ В ПРИДОННЫХ ЧАСТЯХ ВОСХОДЯЩИХ ЗАКРУЧЕННЫХ ПОТОКОВ ТИПА ТОРНАДО	63

МОДЕЛЬ В.Ф. КУРОПАТЕНКО МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ СРЕД И ЕЕ НЕКОТОРЫЕ МАТЕМАТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

С.П. Баутин

Снежинский физико-технический институт НИЯУ МИФИ

SPBautin@mephi.ru

В работе В.Ф. Куропатенко [1] предложена одна математическая модель для описания течений многокомпонентных сред – специальная квазилинейная система уравнений с частными производными. Данная система уравнений построена на основе получения законов сохранения смеси из законов сохранения для компонентов. При этом учитывается как парное взаимодействие различных компонентов, так и кластерное взаимодействие компонентов с введенной виртуальной сплошной средой. Одним из основных достоинств этой модели является ее замкнутость: система содержит одинаковое количество уравнений и искомых функций и для своего замыкания не требует дополнительных гипотез, конкретизирующих смесь.

В данной работе указанная модель многокомпонентных сред рассматривается в случае, когда каждый из N компонентов ($N > 1$) есть идеальный политропный газ.

Для данной модели определяются [2] значения скоростей распространения характеристик (скоростей звука по терминологии газовой динамики) в покоящейся многокомпонентной среде. Получена формула многочлена степени N , положительные корни которого задают квадраты скоростей звука в среде с N компонентами. В случае $N=2$ в явном виде определены значения двух скоростей распространения звуковых характеристик (быстрой и медленной), которые в общем случае не совпадают со скоростями звука в каждом отдельном компоненте. Показано, что найденное таким образом максимальное значение скорости звука в двухкомпонентной среде азота и кислорода с соответствующими воздуху объемными концентрациями, отличается в относительных величинах от скорости звука в воздухе, определенной в физических экспериментах, менее чем на три десятых процента. Численными расчетами установлено наличие трех скоростей звука в трехкомпонентной среде.

В линеаризованном случае решена [3] задача о плавном движении поршня в рассматриваемой двухкомпонентной среде. Область течения разбивается быстрой и медленной характеристиками на три части. В первой имеет место заданный однородный покой, отделенный от искомого течения быстрой характеристикой. Во второй области – в области между быстрой и медленной характеристиками – располагается первое из двух искомых течений. Третья область – область между медленной звуковой характеристикой и движущимся поршнем – есть область определения второго искомого течения. Оба построенные искомые течения являются точными решениями соответствующих начально-краевых задач. На непроницаемом поршне с заданным законом движения удовлетворены условия непротекания для обоих компонентов, а на звуковых характеристиках течения стыкуются непрерывно.

Далее для рассматриваемой модели предполагается, что при x , стремящемся к плюс и к минус бесконечности многокомпонентная среда находится в однородных состояниях со своими постоянными значениями газодинамических параметров, равновесных по скоростям, давлениям и температурам. Для течений, являющихся бегущими волнами, получен [4] аналог условий Гюгонио, с помощью которых по

заданным на плюс бесконечности параметрам течения и по скорости распространения бегущей волны однозначно определяются параметры течения на минус бесконечности. Приведен пример расчета бегущей волны в двухкомпонентной среде, имеющей на бесконечностях указанные состояния, а в средней части течения – два сглаженных сильных разрыва. Эти разрывы получились сглаженными из-за используемых при численных расчетах искусственных вязкости и теплопроводности. В физических экспериментах при ударном воздействии на двухкомпонентную среду наблюдается наличие двух последовательно распространяющихся ударных волн.

Таким образом, показана адекватность рассматриваемой модели В.Ф. Куропатенко как результатам физических экспериментов, так и корректно поставленным математическим задачам, классическим для газовой динамики.

Литература:

1. Куропатенко В.Ф. Модель многокомпонентной среды // Доклады Академии наук. 2005. Т. 403, № 6. С. 761-763.
2. Баутин С.П. Скорость звука в многокомпонентной покоящейся среде // Прикладная механика и техническая физика, 2008. Т. 49, № 3. С. 35-44.
3. Баутин С.П., Дерябин С.Л. Определение скорости звука и решение задачи о поршне в двухкомпонентной среде // «Забабахинские научные чтения. Международная конференция. Тезисы». Снежинск, РФЯЦ-ВНИИТФ, 2007, с. 219-220.
4. Баутин С.П. Частный случай бегущей волны в одной модели многокомпонентной среды // Прикладная механика и техническая физика, 2009. Т. 50, № 4. С. 39-47.

УРАВНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ В ЗАДАЧАХ МЕХАНИКИ СПЛОШНЫХ СРЕД

Ю.М. Ковалев

Южно-Уральский государственный университет (НИУ), Челябинск

Построение уравнений состояния в широком диапазоне давлений является необходимым элементом для математического моделирования нестационарных газодинамических процессов импульсного воздействия на вещество. Однако применение строгих теоретических методов расчета термодинамических свойств материалов позволяет получать результаты только в ограниченных интервалах термодинамических параметров [1,2]. В этой ситуации особое значение приобретают методы построения полуэмпирических уравнений состояния. Вид функциональных зависимостей термодинамического потенциала для полуэмпирического описания определяется из теоретических соображений, а результаты экспериментов используются для определения входящих в эти зависимости коэффициентов.

Несмотря на широкое применение высокомолекулярных соединений в качестве элементов конструкций, для них были получены только калорические уравнения состояния [3-6]. Однако очень часто необходимо знание температур фазовых и полиморфных переходов, которые не могут быть получены в рамках калорических уравнений состояния. Поэтому настоящая работа будет посвящена построению уравнений состояния молекулярных кристаллов, которые можно рассматривать как переход от простых соединений к высокомолекулярным. Это связано с тем, что молекулярные кристаллы нитросоединений (например, ТАТБ) имеют слоистую структуру аналогичную полимерам, когда имеет место сильное взаимодействие внутри слоя и слабое ван-дер-ваальсово взаимодействие между слоями.

Несмотря на то, что решению этой задачи посвящено достаточно большое количество как экспериментальных, так и теоретических работ, теория построения уравнений состояния молекулярных кристаллов и нитросоединений далека от своего завершения. Это связано с тем, что теоретическое определение зависимостей, характеризующих поведение твердых взрывчатых веществ (ВВ), которые относятся к молекулярным кристаллам, осложняется большим числом внутренних степеней свободы молекул, входящих в состав молекулярного кристалла нитросоединений

В настоящее время принято считать, что в уравнения состояния молекулярных кристаллов входит две составляющие: тепловая и «холодная» [7-10]. Тепловая составляющая определяется колебательным движением молекул, входящих в состав кристалла, а холодная составляющая – изменением энергии взаимодействия, как внутри молекулы, так и между молекулами, входящих в состав кристалла, в зависимости от объема. Связь между тепловой и холодной составляющими определяется зависимостью коэффициента Грюнайзена от удельного объема и является одной из основных задач при построении уравнений состояния твердых тел. Зависимость коэффициента Грюнайзена от удельного объема может определяться формулами Ландау - Слейтера, Дугдала – Мак-Дональда и т.д. [2].

Первым шагом при моделировании тепловой составляющей уравнений состояния является определение функциональной зависимости теплоемкости от температуры. В связи с тем, что органические молекулярные кристаллы являются термически малостойкими, легкоплавкими и сублимирующими при низких температурах, экспериментальные зависимости теплоемкости от температуры в широком диапазоне известны для узкого круга веществ в газовой фазе [11,12]. В то же время для целого ряда быстропротекающих процессов интерес представляет поведение твердых органических веществ в области высоких давлений и температур, для которых экспериментальные данные по зависимости

теплоемкости от температуры отсутствуют. В данном случае единственной возможностью оценки поведения теплоемкости является разработка различных расчетных схем [13,14].

В данной работе представлены результаты анализа использования приближений Дебая и Эйнштейна для описания зависимости теплоемкости от температуры, показано, что зависимость теплоемкости от температуры для ряда молекулярных кристаллов нитросоединений может быть описана универсальной кривой. С целью верификации построенных уравнений состояния была определена зависимость коэффициента объемного расширения от температуры. Сравнение экспериментальных данных и теоретической зависимости коэффициента объемного расширения ТАТБ показало, что расхождение составляет не более 2%.

Литература:

1. Бушман А.В., Фортов В.Е. Модели уравнения состояния вещества. / А.В. Бушман, В.Е. Фортов // Успехи физических наук.- 1983. – Т. 140, вып.2.- С. 177 – 199.
2. Жарков, В.Н., Калинин, В.А. Уравнения состояния при высоких температурах и давлениях / В.Н. Жарков, В.А. Калинин. – М.: Наука, 1968.
3. Бушман А.В., Жерноклетов М.В., Ломоносов И.В., Сутулов Ю.Н., Фортов В.Е., Хищенко К.В. Исследование плексигласа и тефлона в волнах повторного ударного сжатия и изэнтропической разгрузки. Уравнение состояния полимеров при высоких плотностях энергии / А.В. Бушман, М.В. Жерноклетов, И.В. Ломоносов, Ю.Н. Сутулов, В.Е. Фортов, К.В. Хищенко // Доклады Академии наук. – 1993. – Т. 329, №5.- С. 581-584.
4. Бушман А.В., Ломоносов И.В., Фортов В.Е., Хищенко К.В. Уравнения состояния полимерных материалов / А.В. Бушман, И.В. Ломоносов, В.Е. Фортов, К.В. Хищенко// Химическая физика. – 1994. – Т.13, №1. – С. 64 – 81.
5. Ломоносов И.В., Фортов В.Е., Хищенко К.В. Модель широкодиапазонных уравнений состояния полимерных материалов при высоких плотностях энергии / И.В. Ломоносов, В.Е. Фортов, К.В. Хищенко // Химическая физика. – 1995. – Т.14, №1. – С. 47 – 52.
6. Хищенко К.В., Ломоносов И.В., Фортов В.Е., Шленский О.Ф. Термодинамические свойства пластиков в широком диапазоне плотностей и температур / К.В. Хищенко, И.В. Ломоносов, В.Е. Фортов, О.Ф. Шленский // Доклады Академии наук. – 1996. – Т. 349, №3.- С. 322-325.
7. Куропатенко В.Ф. Модели механики сплошных сред, Челябинск: Изд-во ЧелГУ, 2007.
8. Куропатенко В.Ф. Уравнения состояния в математических моделях механики и физики. Математическое моделирование. 1992. Т. 4, № 12. С. 112-136.
9. Ковалев, Ю.М. Уравнения состояния и температуры ударного сжатия кристаллических ВВ / Ю.М. Ковалев // Физика горения и взрыва. – 1984. – Т.20, №2. – С. 102 – 107.
10. Ковалев, Ю.М. Математическое моделирование тепловой составляющей уравнения состояния молекулярных кристаллов / Ю.М. Ковалев // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Математическое моделирование и программирование. - 2013. - Т. 6, № 1. - С. 34-42.
11. Сталл Д., Вестрам Э., Зинке Г. Химическая термодинамика органических соединений / Д. Сталл, Э. Вестрам, Г. Зинке. - М.: Мир, 1971.
12. Варгафтик Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей / Н.Б. Варгафтик. М.: Наука, 1972.
13. Цянь-Сюэсень. Физическая механика / Перевод с китайского под ред. Валландера С.В. - М.: Мир, 1965.
14. Щетинин В.Г. Расчет теплоемкости органических веществ в ударных и детонационных волнах / В.Г. Щетинин // Химическая физика. – 1999. – Т. 18, № 5. – С. 90 – 95.

О РАСПРОСТРАНЕНИИ СИЛЬНОГО РАЗРЫВА В ДВУХКОМПОНЕНТНОЙ СМЕСИ

А.В. Красильников^{1,2}, В.Ф. Куропатенко¹

¹ ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. академ. Е.И. Забабахина», Снежинск

² Челябинский Государственный Университет

press-csu@yandex.ru

В рамках модели многокомпонентных сред [1] получено численное решение одномерной плоской задачи о распространении сильного разрыва в смеси двух идеальных газов. Уравнения модели являются инвариантными относительно преобразования Галилея [2], причём законы сохранения массы, импульса и энергии (уравнения Эйлера-Гельмгольца) для смеси получаются суммированием соответствующих законов сохранения для компонентов. Расчеты выполнялись лагранжево-эйлеровым методом с использованием системы разностных уравнений, учитывающей кластерное и парное взаимодействия между компонентами смеси. На лагранжевом этапе был использован метод расчета ударных волн [3]. Показано, что в случае задания одинаковых параметров для каждого газа численное решение согласуется с аналитическим [4]. Исследовано влияние кластерного и парного взаимодействий на параметры течения. Показано, что наибольший вклад в релаксацию скоростей за фронтом УВ даёт именно кластерное взаимодействие.

Литература:

1. Куропатенко В.Ф. Об одном методе сквозного счета ударных волн // Вестник ЮУрГУ. Серия «Математическое моделирование и программирование». 2014, том 7, №1, с. 62-75.
2. Ю. М. Ковалев, В. Ф. Куропатенко, Анализ инвариантности некоторых математических моделей многокомпонентных сред, Вестн. Южно-Ур. Ун-та. Сер. Матем. Мех. Физ., 2012, выпуск 6, с. 4-7.
3. Куропатенко В.Ф. Новые модели механики сплошных сред // ИФЖ, 2011, том 84, №1, с. 74-92.
4. Куропатенко В.Ф. Модели механики сплошных сред. Челябинск, Челяб. гос. ун-т, 2007.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КАК ИНСТРУМЕНТ ДЛЯ ОПИСАНИЯ СЛОЖНЫХ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

И.Р. Макеева, Д.А. Варфоломеев
ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. академ. Е.И. Забабахина», Снежинск

i.r.makeyeva@vniitf.ru

Памяти профессора В.Ф. Куропатенко посвящается...

Сложно представить современный мир без математического моделирования, которое применяется для исследований во всех отраслях науки и техники. При этом объект исследования заменяется математической моделью, связь которой с реальностью осуществляется с помощью цепочки гипотез, идеализаций и упрощений. С развитием вычислительной техники, начиная со второй половины 20 века, основным методом исследования свойств рассматриваемого объекта становится компьютерное моделирование, при этом математическая модель превращается в компьютерную модель, которая по своим свойствам может отличаться не только от исследуемого объекта, но и от разработанной ранее математической модели.

Построение математической, а затем и компьютерной модели состоит из нескольких основных этапов. Это общее физическое описание изучаемого объекта или процесса, математическая формализация выявленных закономерностей, разработка или выбор численного метода для компьютерной реализации математических уравнений, обоснование его адекватности (аппроксимации, точности, сходимости), верификация и валидация модели путем сравнения с доступными экспериментальными данными и аналитическими решениями.

Особенно важную роль математическое моделирование имеет при описании сложных физических процессов, таких как высокоинтенсивное взаимодействие тел, физика ударных волн и высокотемпературных явлений. Как правило, экспериментальное изучение таких процессов является трудоемким и дорогостоящим, эксперименты проводятся при некоторых диапазонах изменения физических параметров, а в некоторых случаях являются невозможными.

Научная деятельность В.Ф. Куропатенко в течение шести десятилетий была связана с разработкой и обоснованием математических моделей, позволяющих в приближении механики сплошной среды описывать поведение веществ в широком диапазоне изменения физических характеристик – плотности, давления, температуры. Учитывались различные физические процессы – ударные и детонационные волны, тепловые и радиационные нагрузки, упругие и пластические деформации и разрушение первоначально твердых тел, полиморфные фазовые переходы, плавление, испарение, ионизация, перемешивание.

Поведение сплошной среды описывается системой законов сохранения массы, импульса и энергии, которые замыкают соотношения, выражающие свойства среды, и уравнения состояния. Для гладких течений законы сохранения, как правило, записываются в дифференциальной форме. Присутствие сильных разрывов, таких как ударные волны, необходимо применять специальные механизмы, позволяющие описать диссипацию энергии в ударном слое. В.Ф. Куропатенко является автором одного из четырех известных методов описания диссипации энергии, основанном на использовании соотношений Гюгонио-Ренкина, который позволяет адекватно передавать рост энтропии на ударной волне [1]. Уникальным является его неоднородный метод расчета ударных волн, позволяющий отслеживать движение

сильных, слабых и контактных разрывов [2]. Метод реализован в программном комплексе «Волна» [3], который в течение более 40 лет является одним из основных производственных комплексов в РФЯЦ-ВНИИТФ. При этом В.Ф. Куропатенко успешно применял аналитические методы анализа разностных уравнений [4], что позволяет еще до их реализации в виде компьютерной программы оценить свойства разностного метода и выбрать оптимальный.

При протекании сложных физических процессов вещества могут переходить из одного состояния в другое, поэтому особенно важным является обеспечение возможности согласованного описания их свойств (уравнений состояния) в широком диапазоне давлений и температур с учетом фазовых переходов всех типов. В.Ф. Куропатенко разрабатывал широкодиапазонные уравнения состояния, вид функциональных зависимостей термодинамических величин при этом выбирался на основе теоретических предположений о характере их поведения, а коэффициенты подбираются из условий наилучшей аппроксимации экспериментальных данных [5, 6]. Построенные им уравнения состояния продуктов взрыва, горных пород, металлов успешно применяются при проведении расчетов в РФЯЦ-ВНИИТФ.

Для тестирования, верификации и валидации математических моделей используются аналитические решения. В.Ф. Куропатенко разработал целый ряд таких решений, например: сходящиеся к центру симметрии оболочки из сжимаемого конденсированного вещества, захлопывание сферически симметричных полостей в сжимаемом конденсированном веществе [7, 8], взаимодействие волн разрежения, образованных при мгновенном прогреве конденсированного сжимаемого вещества, приводящее к откольному разрушению [9].

В природе чаще всего встречаются многокомпонентные многофазные среды, и последнее десятилетие научной деятельности В.Ф. Куропатенко было в большой степени посвящено разработке моделей многокомпонентных сред. Им предложена интересная модель, в рамках которой уравнения, описывающие законы сохранения смеси в целом, получаются суммированием соответствующих уравнений для отдельных компонентов смеси [10].

Работы В.Ф. Куропатенко в области математического моделирования сложных физических процессов являются примером системного научного подхода к разработке и обоснованию математических моделей. Разработанные им численные методы и уравнения состояния в течение полувека успешно используются в производственных программных комплексах РФЯЦ-ВНИИТФ.

Литература:

1. Куропатенко В.Ф. Метод расчета ударных волн //ДАН СССР.– 1960. – В.3, №4. – 771 с.
2. Куропатенко В.Ф. Приближенный метод расчета величин за фронтом ударной волны //Числ. методы механики сплошной среды. –1970. – Т.1, №6. –С. 77-83.
3. Куропатенко В.Ф., Коваленко Г.В., Кузнецова В.И. и др. Комплекс программ ВОЛНА и неоднородный разностный метод для расчета неустановившихся движений сжимаемых сплошных сред (части 1 и 2) //Вопросы атомной науки и техники., Сер. Мат. Моделирование физ. процессов. – Москва, 1989.–Вып.2. – С. 9-25.
4. Куропатенко В.Ф. Локальная консервативность разностных схем для уравнений газовой динамики //Журнал выч. матем. и матем. физики. – М. – т.25, №8. – 1985. – с.1176-1188.

5. Куропатенко В.Ф. Модели механики сплошных сред // Челябинск, Челяб. гос. ун-т, 2007. – с. 92-145
6. Куропатенко В.Ф. Уравнение состояния продуктов детонации плотных ВВ //ФГВ. –1989. – Т.25, №6. –С. 112-117
7. Куропатенко В.Ф. Схлопывание сферических оболочек и полостей в идеальной сжимаемой жидкости // Тезисы докладов Всероссийской конф. «Аэродинамика и газовая динамика в XXI веке», посв. 80-летию акад. Г.Г. Черного – МГУ, 2003 г.
8. Куропатенко В.Ф. Коллапс сферического пузырька в идеальной сжимаемой жидкости // Тезисы VII Забабахинских научных чтений. – Снежинск, 2003 г
9. Куропатенко В.Ф., Макеева И.Р. О точности расчетов откольного разрушения //Хим. физика. –2002. – Т.21, №9. –С. 72-78.
10. Куропатенко В.Ф. Модель многокомпонентной среды //ДАН, –2005. – Т.403, №6. –С. 761-763.

КУМУЛЯТИВНЫЕ ПРОЦЕССЫ И ЯВЛЕНИЯ

В.А. Симоненко

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. академ. Е.И. Забабахина», Снежинск

Интерес человечества к кумулятивным явлениям стал проявляться в древности, по-видимому, ещё в далёкие времена палеолита (например, орудия и оружие древних людей) и расширился с развитием цивилизации. Научный подход к ним начал зарождаться во второй половине 19-го. Обычно начало относят к решению Безантом (Besant) в 1859, а затем Релеем (Rayleigh) в 1917 году задачи о закрытии сферической полости в воде при мгновенном изъятии из неё сферического объёма вещества. Актуальность изучения этого явления в то время была обусловлена разрушением гребных винтов судов. Следующим стимулирующим импульсом явилось использование в военном деле кумулятивных зарядов во время Второй мировой войны.

Системный подход начал складываться в послевоенные годы в значительной степени благодаря научному состязанию во время ядерного противостояния после войны США и СССР. Существенный прогресс был достигнут в 50-70-х годах прошлого века в связи с работами по созданию и применениях ядерных взрывных устройств. В этот же период в ходе расширенных теоретических, в основном, гидрогазодинамических исследований были получены результаты, которые выявили определяющие свойства кумулятивных процессов. Они заключаются в накоплении определённых свойств среды по мере развития процесса. Такими свойствами могут выступать плотность вещества и/или давления, плотности энергии и/или температуры. Было обращено внимание на то, что в реальных процессах накопление таких свойств приводит к изменению характера течения: например, адиабатическое движение со сжатием сферически симметричной автомодельной ударной волны приводит в движение с теплопроводностью, при котором изменяется режим повышения плотности энергии.

Важный вклад в развитие этого направления внёс Е.И. Забабахин в пионерских работах 1950-1960-х годов. Он указал ряд новых по тому времени процессов – сходящаяся детонационная волна, периодическая слоёная система (с привлечением В.Ф. Куропатенко для численного моделирования слоёных систем), ряд конфигураций магнитных волн, сходящаяся упругая волна и волна ударных полиморфных превращений, проанализировал особенности протекания таких процессов. Специальное внимание уделил обсуждениям теоретических результатов, в которых появляются особенности с неограниченными значениями контролируемых параметров. Он назвал их явлениями с «неограниченной» кумуляцией и уделил много внимания поиску формальных доказательств невозможности такой кумуляции в реальных условиях, указав ряд механизмов, которые ведут к недостижению бесконечных состояний. Он также обратил внимание на то, что в ряде случаев вновь включающиеся механизмы не устраняют, а изменяют характер протекания кумулятивного процесса.

На основе анализа широкого класса природных и искусственно создаваемых явлений в докладе предлагается расширенный подход к категории «кумулятивные явления». Во главу этого подхода ставится накопление определённого свойства вовлеченной в них среды. Другим важным свойством таких явлений служит замена базового процесса на другой при достижении критериального уровня параметра, определяющего смену режимов (плотности вещества, энтропии, температуры и плотности энергии, в том числе и кинетической). Будем считать, что простые, «неполные» кумулятивные явления, состоят из одного процесса. Такой процесс может приводить либо к полному разрушению кумулятивного течения (например,

разрушение течения вследствие неустойчивости). В сложных кумулятивных явлениях происходит смена одного кумулятивного процесса на другой.

Приводятся многочисленные примеры природных и искусственно создаваемых течений такого вида. Обсуждаются вопросы организации кумулятивных течений. Для этого всегда должно существовать или создаваться соответствующее силовое поле. Оно может иметь разную природу. Это может быть поле давления, гравитационное поле, или искусственно создаваемое «поле» кинетической энергии в виде профиля скорости.

При таких расширенных определениях к кумулятивным процессам можно отнести задачу о точечном взрыве в идеальном газе или о реальном сильном взрыве в газовой среде, о сильном взрыве в реальных плотных средах, задачи с волнами разрежения и о метании ими тел... К ним относятся также астрофизические задачи об образовании звезды из протозвёздного облака, об образовании планет, о столкновении тел с гравитационными полями.

Широкий класс кумулятивных процессов дает рассмотрение лазерного излучения с многочисленными применениями его. В основе этих процессов лежит явление «конденсации» фотонов как бозе-частиц. Приводится ряд примеров такой конденсации. Обращено внимание на возможности многостадийной организации кумулятивных явлений с использованием лазерного излучения.

Формированию предлагаемого похода способствовало углубление понимания процессов, сопровождающих сильные взрывы в различных средах, в частности особенности протекания сильных взрывов в атмосфере и в подземных условиях, в ближних областях от места взрыва, на удалении, в областях полиморфных превращений в веществах. Этот подход, в частности, стимулировал постановку графитовых образцов в двух натуральных экспериментах, рассмотрение технологических применений сильных взрывов – камуфлетных и взрывов на выброс. Интересные реализации кумулятивных процессов имеют место при распространении акустических волн давления в предварительно напряженном горном массиве (например, в нефтеносном пласте, при котором происходит формирование и развитие трещин с подключением литостатического давления), во фронте пламени при развитии процессов горения.

Появление новых экспериментальных возможностей способствует организации и углублённому изучению процессов и явлений с позиций предлагаемой методологии. Расширяются также возможности применения этой методологии к исследованиям природных явлений, таких как образование трубок взрыва (диатрем) в земной коре, выход волны цунами на берег, высокоскоростное столкновение астероидов и комет, взрывные процессы в звёздных объектах, включая нейтронные звезды и др.

Несмотря на разнообразную природу кумулятивных явлений, общим для них является методология исследований. Сжато её можно сформулировать следующим образом: необходимо выделить базовый процесс, в русле которого зарождаются и происходят изменения, которые на следующем этапе приведут к изменению базового режима превращения или течений. Очевидно, для таких сложных явлений не следует рассчитывать на единое аналитическое описание. Следует рассчитывать на более сложную, но вполне работоспособную технологию поэтапных описания связанной цепи процессов. Она заключается в создании концептуальной модели явления с изложением теоретических моделей и режимов их взаимодействия для всех реализующихся процессов, в разработке программного комплекса, численно моделирующего взаимодействующие процессы с адекватным учётом особенностей таких взаимодействий.

АНАЛИТИЧЕСКОЕ РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ О СХОДЯЩЕЙСЯ УДАРНОЙ ВОЛНЕ В ГАЗЕ

Е.С. Шестаковская

Южно-Уральский государственный университет (НИУ), Челябинск

Математическое моделирование динамических процессов в механике сплошных сред в настоящее время является одним из важнейших инструментов исследований. Для решения конкретных задач используются уже существующие или создаются новые модели и численные методы. Для оценки свойств разностных схем, аппроксимирующих законы сохранения, широко применяются априорные методы, такие, как исследование устойчивости, аппроксимации, консервативности, дистракции и др. Однако важнейшим способом проверки достоинств и недостатков математической модели в настоящее время является расчёт эталонных задач, имеющих аналитическое решение, и сравнение результатов расчётов с этими решениями.

Благодаря развитию теории размерности и подобия в начале прошлого столетия появился ряд работ, содержащих автомодельное решение задачи о фокусировке ударной волны в бесконечном идеальном газе. Первой опубликованной работой была работа Гудерля [1], в которой предполагалось, что амплитуда ударной волны неограниченно возрастает по мере приближения ее к центру симметрии. Далее автомодельное решение задачи о сходящейся ударной волне было опубликовано Л.И. Седовым [2] и К.П. Станюковичем [3]. Обзор работ по фокусировке ударных волн и полостей изложен в работе К.В. Брушлинского и Я.М. Каждана [4]. Решение для автомодельной центрированной волны сжатия получено И.Е. Забабахиным и В.А. Симоненко [5]. Новые автомодельные решения для различных режимов безударного сжатия идеального газа и схлопывания сферической полости с образованием ударной волны получены А.Н. Крайко [6].

В данной работе представлено аналитическое решение задачи о сходящейся ударной волне и о динамическом сжатии газового шара, полученное в соавторстве с Куропатенко Валентином Федоровичем, в следующей постановке. В начальный момент времени скорость холодного идеального газа равна нулю, а на границе шара задана отрицательная скорость. Иными словами, задан разрыв скорости. После распада разрыва из этой точки начнет распространяться ударная волна к центру симметрии. Граница шара будет двигаться по определенному закону, согласованному с движением ударной волны. В эйлеровых переменных она движется, но в лагранжевых переменных её траектория является вертикальной линией. Вообще говоря, все траектории частиц являются вертикальными линиями, вдоль которых сохраняется то значение энтропии, которое возникло за ударной волной. Получены уравнения определяющие структуру течения газа между фронтом ударной волны и границей, как функции времени и эйлеровой или лагранжевой координаты, а так же зависимость энтропии от скорости ударной волны. Задача решена оригинальным методом, отличающимся от общепринятых для построения автомодельных решений. В эйлеровых координатах построено решение для случая сферической симметрии [7], разработан алгоритм поиска показателя автомодельности. Для широкого диапазона значений показателя адиабаты найдены соответствующие значения показателя автомодельности идентичные показателям автомодельности работы [6]. В лагранжевых координатах решение задачи было получено для трех типов симметрии: плоского, цилиндрического и сферического [8]. Найдено значение показателя автомодельности $n = n_*$, при котором решение полностью совпадает с решением в эйлеровых координатах. Однако это

значение не является единственным, а делит решение задачи на два типа. В случае, когда $0 < n < n_*$, происходит коллапс газового шара – его объём стремится к нулю. При $n > n_*$ на границе газа формируется линия, являющаяся характеристикой исходной системы уравнений. Она фокусируется одновременно с ударной волной. В области между ударной волной и этой характеристикой также построено решение. Этому случаю соответствует решение для показателя автомодельности равного коэффициенту типа симметрии задачи $\mu = 1, 2, 3$, при котором скорость ударной волны является константой, а, следовательно, давление и плотность тоже не изменяются.

Литература:

1. **Guderley G.** *Starke kugelige und zylindrische Verdichtungsstöße in der Nähe des Kugelmittelpunktes bzw. der Zylinderachse* // *Luftfahrtforschung*. 1942. Bd. 19. Lfg. 9. P. 302–312.
2. **Седов Л.И.** О неустановившихся движениях сжимаемой жидкости // Доклады Академии наук СССР. 1945. Т. 47, № 2. С. 94–96.
3. **Станюкович К.П.** Автомодельные решения уравнений гидромеханики, обладающих центральной симметрии // Доклады Академии наук СССР. 1945. Т. 48, № 5. С. 331–333.
4. **Брушлинский К.В., Каждан Я.М.** Об автомодельных решениях некоторых задач газовой динамики // *Успехи математических наук*. 1963. Т. 18. Вып. 2. С. 3–23.
5. **Забабахин И.Е., Симоненко В.А.** Сферическая центрированная волна сжатия // *Прикладная математика и механика*. 1978. Т.42. № 3. С.573.
6. **Крайко А.Н.** Быстрое цилиндрически и сферически симметричное сильное сжатие идеального газа // *Прикладная математика и механика*. 2007. Т.71, №5. С. 744–760.
7. **Куропатенко В.Ф., Шестаковская Е.С., Якимова М.Н.** Динамическое сжатие холодного газового шара // Доклады академии наук. 2015. Т. 461, № 5. С. 530–532.
8. **Куропатенко В.Ф., Магазов Ф.Г., Шестаковская Е.С.** Аналитическое решение задачи о сходящейся ударной волне в газе в одномерном случае // *Вестник ЮУрГУ. Серия Математика. Механика. Физика*. 2017. Т. 9, № 4. С. 52–58.