

Архипов В.Н.  
Борисов В.А.  
Борисов А.М.  
Валько В.В. и др.

# **Механическое действие ядерного взрыва**



МОСКВА  
ФИЗМАТЛИТ ®

УДК 532.5, 539.5  
М55  
ББК 24.54

*Авторский коллектив:*

В. Н. Архипов, В. А. Борисов, А. М. Будков, В. В. Валько,  
А. М. Галиев, О. П. Гончарова, И. М. Зайков, Б. В. Замышляев,  
А. М. Кнестяпин, В. С. Королев, В. Д. Кузовлев, В. Е. Макаров,  
И. Ю. Селиверстов, Г. И. Семенов, В. В. Смазнов,  
Е. И. Смирнов, О. Н. Ушаков

**Механическое действие ядерного взрыва.** — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. — 384 с. — ISBN 5-9221-0261-3.

В книге предлагается систематическое описание физических и математических моделей процессов развития ядерного взрыва в воздухе и грунте и механического действия взрыва на воздушную среду и грунтовый массив. Рассмотрены процессы передачи энергии внешней среде, формирование и распространение тепловой и ударной волн, процессы испарения и плавления грунта, формирование и распространение сейсмозрывной волны в грунтовом массиве, образование воронки и сопутствующие явления. Особое внимание уделено влиянию на перечисленные процессы границ раздела сред и различных неоднородностей грунтового массива: слоистости осадочных грунтов, трещин, разломов скальных пород и т.п.

Для научных сотрудников и инженеров, работающих в области механики сплошной среды, физики высоких плотностей энергии и математического моделирования действия взрывных и импульсных нагрузок, а также для аспирантов и студентов старших курсов указанных специальностей.

*Редакционная коллегия:*

В. Н. Архипов, И. Н. Валинкин, Б. В. Замышляев,  
В. А. Пиджаков, Б. А. Шилобреев

## СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие .....	6
<b>ЧАСТЬ ПЕРВАЯ. ФИЗИЧЕСКИЕ И МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ МЕХАНИЧЕСКОГО ДЕЙСТВИЯ ЯДЕРНОГО ВЗРЫВА .....</b>	<b>9</b>
Глава 1. Основные физические процессы, определяющие механическое действие ядерного взрыва .....	11
1.1. Воздушный взрыв .....	11
1.2. Подземный взрыв .....	13
1.3. Взрыв вблизи поверхности грунтового массива .....	14
1.4. Взрыв у входа в протяженный канал .....	19
Глава 2. Физические модели и методы математического моделирования .....	21
2.1. Начальная стадия взрыва .....	21
2.1.1. Постановка задачи .....	21
2.1.2. Одномерная методика .....	22
2.1.3. Двумерная методика расчета радиационно-газодинамических процессов .....	25
2.2. Воздушная ударная волна .....	33
2.2.1. Радиационно-газодинамическая методика с учетом турбулентного переноса .....	34
2.2.2. Газодинамические методики .....	43
2.3. Механическое действие взрыва на грунтовый массив .....	47
2.3.1. Постановка задачи о расчете параметров сейсмозрывных волн .....	47
2.3.2. Лагранжева методика расчета параметров сейсмозрывных волн .....	50
2.3.3. Совместная эйлерово-лагранжева осесимметричная методика расчета упругопластических процессов .....	58
2.4. Газодинамический поток в протяженном канале при ядерном взрыве на входе .....	62
2.4.1. Физическая модель взаимодействия высокоэнергетического потока со стенками канала .....	62
2.4.2. Методика расчета газодинамических процессов в системе разветвляющихся каналов .....	66
2.4.3. О допустимости моделирования процесса затекания воздушной ударной волны в открытый канал в двумерной постановке .....	82

Глава 3. <b>Константное обеспечение математических моделей</b> .....	87
3.1. Уравнение состояния вещества .....	87
3.2. Коэффициенты поглощения фотонов высокотемпературной плазмой .....	111
3.3. Модели деформирования грунтовых сред .....	120
Глава 4. <b>Сравнение расчетных и экспериментальных данных</b> .....	127
4.1. Камуфлетные тротилловый и ядерный взрывы .....	127
4.2. Взрыв заряда ВВ на скальной породе .....	130
4.3. Взрыв заряда ВВ на мягком грунте .....	134
4.4. Ядерный взрыв в канале .....	136
4.5. Ядерный взрыв на поверхности воды .....	138
<b>ЧАСТЬ ВТОРАЯ. ДЕЙСТВИЕ ЯДЕРНОГО ВЗРЫВА НА РАЗЛИЧНЫЕ СРЕДЫ</b> .....	144
Глава 5. <b>Воздушный взрыв</b> .....	146
5.1. Влияние высоты взрыва на формирование тепловой и ударной волн .....	146
5.2. Параметры воздушной ударной волны .....	153
Глава 6. <b>Подземный взрыв</b> .....	165
6.1. Общие положения .....	165
6.2. Радиационно-газодинамическая стадия взрыва .....	168
6.2.1. Взрыв с плотным окружением заряда грунтом .....	168
6.2.2. Взрыв в подземной воздушной полости .....	171
6.3. Упругопластическая стадия взрыва .....	174
6.3.1. Сейсмическое действие подземного ядерного взрыва .....	175
6.3.2. Остаточные явления камуфлетного взрыва .....	184
Глава 7. <b>Взрыв вблизи поверхности грунта</b> .....	189
7.1. Основные источники механического действия взрыва на грунтовый массив .....	189
7.2. Эффективность взрыва .....	194
7.3. Особенности развития ядерного взрыва вблизи дна водоема .....	198
Глава 8. <b>Воздушная ударная волна вблизи поверхности земли</b> .....	206
8.1. Контактный взрыв .....	206
8.2. Взрыв над поверхностью грунта .....	209
8.3. Малозаглубленный взрыв .....	215
Глава 9. <b>Сейсмозрывные волны в однородных, градиентных и слоистых средах</b> .....	220
9.1. Общая волновая картина .....	221
9.2. Однородные и градиентные среды .....	227
9.2.1. Однородный массив мягкого грунта .....	228
9.2.2. Однородный массив скального или полускального грунта .....	232
9.2.3. Градиентный грунтовый массив .....	237
9.3. Двухслойные и многослойные среды .....	245
9.3.1. Двухслойный грунтовый массив .....	245
9.3.2. Многослойные осадочные грунтовые массивы .....	254

Глава 10. Сейсмозрывные волны в скальном массиве со структурными неоднородностями .....	271
10.1. Закономерности взаимодействия сейсмозрывных волн с разломом и зоной трещиноватости .....	271
10.1.1. Влияние мощности разлома .....	273
10.1.2. Влияние угла падения сейсмозрывной волны на разлом ....	277
10.1.3. Влияние физико-механических свойств скального массива и породы-заполнителя в разломе .....	281
10.1.4. Взаимодействие плоской сейсмозрывной волны с системой трещин в скальном массиве .....	286
10.1.5. Влияние волнистости межблоковых границ .....	288
10.2. Воздействие взрыва на скальный массив со структурными неоднородностями .....	295
10.2.1. Особенности распространения сейсмозрывных волн в скальном массиве с субвертикальным разломом .....	296
10.2.2. Взрыв на скальном массиве с субгоризонтальными зонами трещиноватости .....	303
10.2.3. Взаимодействие сейсмозрывных волн с крупным структурным блоком в скальном массиве .....	309
10.2.4. Взаимодействие сейсмозрывных волн с тонкими трещинами	316
10.2.5. Особенности формирования зоны разрушения скального массива с геоструктурными нарушениями .....	320
Глава 11. Воронка выброса и сопутствующие явления.....	323
11.1. Воронка выброса и навал грунта.....	325
11.2. Остаточное смещение грунта.....	328
11.3. Масса испаренного и расплавленного грунта.....	330
11.4. Модель выброса грунта из воронки.....	331
Глава 12. Действие ядерного взрыва на протяженные каналы .....	333
12.1. Физические особенности развития взрыва у входа в канал .....	333
12.2. Затекание тепловой волны и формирование в канале сильной ударной волны.....	336
12.3. Распространение ударной волны в канале при взрыве на входе ..	348
12.4. Воздушная ударная волна в канале при взрыве в стороне от входа.....	353
12.4.1. Затекание воздушной ударной волны в канал.....	353
12.4.2. Взаимодействие волны с поворотом и разветвлением канала .	359
Приложение. Наборы констант для моделей различных грунтов.....	361
Список литературы.....	365

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Данная книга является логическим развитием близких по тематике разделов разработанной коллективом сотрудников ЦФТИ МО РФ монографии «Физика ядерного взрыва» (М.: Изд-во МФТИ, 2000) и объединенных здесь под общим названием — механическое действие ядерного взрыва.

Само понятие механического действия взрыва достаточно емкое и поэтому не вполне определенное. Во-первых, — действие на что?, и во-вторых, — в чем состоит его содержание, какие процессы подлежат рассмотрению? Во многих работах под этим названием понимается действие взрывных нагрузок (тепловых и механических) на какие-либо объекты (технику, сооружения и пр.), что скорее можно отнести к поражающему действию взрыва. В данной книге в качестве объектов воздействия рассматривается сама геофизическая среда (воздушная и водная среды, различные грунтовые массивы), в которой осуществляется ядерный взрыв, а под механическим действием взрыва понимается совокупность физических процессов (тепловые и ударные волны в воздухе, воде, грунте, сейсмозрывные волны в грунтовых массивах и др.), определяющих воздействие взрыва на среду.

В книге в основном рассматривается ядерный взрыв вблизи поверхности земли, для которого механические факторы являются ведущими, а также предельные варианты такого взрыва — воздушный и подземный, при анализе которых можно не учитывать влияние границы раздела воздух–земля. В книге также кратко рассматриваются особенности развития ядерного взрыва вблизи границы раздела грунт–вода и взрыва на входе в протяженный канал.

Из всего многообразия физических процессов, определяющих механическое действие взрыва на геофизическую среду, авторы ограничились анализом волновых процессов и процессов, происходящих в течение не более, чем первых десятков секунд после взрыва. Вне содержания книги остались такие вопросы, как формирование крупномасштабных газодинамических образований в атмосфере; фильтрация газов через разрушенную взрывом породу и кондуктивная теплопроводность, определяющие послевзрывное термодинамическое состояние среды в центральной зоне подземного ядерного взрыва; релаксационные процессы в грунтовых массивах, обусловленные их тектонической структурой (локальные подвижки отдельных блоков, афтершоки, ...) и др. Безусловно эти явления тесным

образом связаны с действием взрыва на волновой стадии, но они имеют существенно больший временной масштаб, отличаются от волновой стадии характером физических процессов и заслуживают самостоятельного рассмотрения.

Основные результаты исследований, вошедшие в книгу, получены методами математического моделирования физических процессов развития ядерного взрыва. При изложении материалов исследований авторы придерживались следующей схемы. Вначале на качественном уровне дается краткое описание изучаемых явлений, затем обсуждаются их физические модели и формулируется математическая постановка задач, решение которых проводится численными методами, и на завершающем этапе дается подробный анализ физических процессов на различных стадиях развития ядерного взрыва.

Структурно книга состоит из двух частей. В первой (методической) части излагаются физические и математические модели исследуемых явлений. Главная особенность физических моделей процессов развития ядерного взрыва состоит в необходимости учета оптических, термодинамических и механических свойств различных веществ в широком диапазоне взрывных нагрузок: от экстремально высоких — в зоне энерговыделения — до нагрузок, характерных для акустических и упругих волн, — в дальней зоне взрыва. Авторами дается подробный анализ различных предельных теоретических моделей физического состояния вещества и имеющегося экспериментального материала, на основе которых строятся широкодиапазонные интерполяционные уравнения состояния и определяются спектральные и осредненные коэффициенты поглощения излучения. Помимо анализа уравнений состояния вещества в области высоких термодинамических параметров кратко излагаются также основные стороны используемых моделей деформирования грунтов в области упругопластических нагрузок.

При анализе математических моделей центральное место занимают вопросы их численной реализации. Авторами используются различные численные методики, выбор которых главным образом определяется особенностями решаемых задач. Обоснованность методов математического моделирования и их возможности продемонстрированы на примерах расчета развития конкретных натуральных и крупномасштабных взрывов. Изложенные методы моделирования имеют достаточно общий характер и можно надеяться, что они будут полезны специалистам при решении различных прикладных задач, связанных с действием импульсных нагрузок.

Во второй (физической) части книги на основе результатов математического моделирования дано систематическое описание физических процессов, сопровождающих развитие ядерного взрыва вблизи поверхности земли на различной высоте (глубине), включая подземный и воздушный взрывы. Несмотря на то что при изучении действия взрыва на внешнюю среду использовалось модельное представление взрывного источника,

получены непротиворечивые результаты, согласующиеся с известными экспериментальными данными, в том числе с данными натуральных испытаний. В то же время используемый авторами методический подход позволил дать достаточно цельное представление о комплексе физических и механических процессов, сопровождающих развитие такого сложного и многогранного явления как ядерный взрыв, и, кроме того, позволил дополнить физическую картину развития взрыва новыми данными общенаучного плана. К таким данным могут быть отнесены вопросы распределения энергии взрыва между различными средами в условиях резких контактных границ в области источника взрыва; распространения сейсмозрывных волн в грунтовом массиве как сложной геофизической среде с различными неоднородностями и геоструктурными нарушениями; взаимное влияние процессов в воздушной и грунтовой средах при подземных ядерных взрывах в полостях и ядерных взрывах вблизи поверхности земли.

Авторы полагают, что их исследования механического действия ядерного взрыва будут способствовать расширению представлений об интенсивных возмущениях в геофизической среде, вызванных источниками другой физической природы — землетрясениями, прохождением метеорных тел через атмосферу, ударным кратерообразованием и др.

Рассмотренные в книге вопросы исследования процессов развития ядерного взрыва как физического явления относятся к фундаментальным разделам физики, механики, вычислительной математики и авторы при их решении, естественно, опирались на результаты работ в этой области, проводимых как за рубежом, так и в различных институтах РАН, Минатома и других ведомств.

Авторы особенно благодарны сотрудникам Института динамики геосфер РАН В.Н. Родионову, В.В. Адушкину, В.Н. Костюченко, В.М. Цветкову, Б.Д. Христофорову и И.В. Немчинову за многолетнее научное сотрудничество и плодотворное обсуждение результатов исследований. Авторы приносят искреннюю благодарность сотрудникам Института прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН и Института математического моделирования РАН В.Я. Гольдину, А.Ф. Никифорову, А.В. Забродину, Н.Н. Калиткину, Б.Н. Четверушкину, В.Г. Новикову и В.Ф. Тишкину, которые своими работами и научным сотрудничеством с авторами книги оказали им неоценимую помощь в создании методического аппарата исследований.


Книга является коллективным трудом, тем не менее можно отметить преимущественный вклад авторов в подготовку и написание отдельных её разделов: В.Н. Архипов (1–4, 6, 7, 9, 10, 12), В.А. Борисов (5, 8), А.М. Будков (2, 4, 6, 9, 10), В.В. Валько (2, 3, 6, 7), А.М. Галиев (п. 4.5), О.П. Гончарова (3, 5, 6, 8), И.М. Зайков (2, 9), Б.В. Замышляев (3, 7), А.М. Кнестяпин (1, 12), В.С. Королев (п. 2.4.3, 12), В.Д. Кузовлев (п. 2.4.3), В.Е. Макаров (2, 4, 6, 8, 12), И.Ю. Селиверстов (п. 2.2.2, 5, 8), Г.И. Семенов (5, 8), В.В. Смазнов (2, 4, 12), Е.И. Смирнов (1, 7, 9), О.Н. Ушаков (2–4, 7–10, 12).





ЧАСТЬ ПЕРВАЯ

ФИЗИЧЕСКИЕ И МАТЕМАТИЧЕСКИЕ  
МОДЕЛИ МЕХАНИЧЕСКОГО  
ДЕЙСТВИЯ ЯДЕРНОГО  
ВЗРЫВА



В первой части книги рассмотрены физические и математические модели взрывных процессов, используемые в дальнейшем при исследовании различных проявлений механического действия ядерного взрыва на воздушную и грунтовую среды. С учетом особенностей развития ядерного взрыва на различных стадиях последовательно излагаются постановки основных задач и методы их решения. Одно из ключевых мест в математическом моделировании механического действия ядерного взрыва занимает задача о начальной стадии взрыва, на которой формируются основные источники воздействия взрыва на воздушную и грунтовую среды. Безусловно, развитие начальной стадии взрыва тесным образом связано со спецификой срабатывания ядерного устройства. Авторами используется модельный подход, отражающий главную особенность ядерного взрыва — выделение огромной энергии в ограниченном объеме за короткий промежуток времени. При изучении закономерностей развития ядерного взрыва на различных стадиях используются численные методы механики сплошной среды. Выбор тех или иных численных методов прежде всего обусловлен особенностями решаемых задач, а также во многом и сложившимися взглядами авторов.

Одним из важных этапов численного моделирования последовательных стадий развития ядерного взрыва является обеспечение математических моделей данными по уравнениям состояния и коэффициентам поглощения излучения различных веществ, а также упругопластическими характеристиками грунтовых сред. Авторами дан краткий анализ состояния исследований по данной проблеме. Изложены методы конструирования широкодиапазонных уравнений состояния различных веществ с использованием имеющегося экспериментального материала и некоторых предельных теоретических моделей. Рассчитаны спектральные, групповые и интегральные коэффициенты поглощения ультрафиолетового и мягкого рентгеновского излучения в воздухе и типовых грунтах, необходимые для численного моделирования высокотемпературных процессов. В области упругопластических нагрузок рассмотрены модели деформирования грунтовых сред с выделением трех основных типов грунтов: скальных, полускальных и мягких.

Особое место в проблеме математического моделирования процессов развития ядерного взрыва занимают вопросы апробации используемых численных методик. Тестирование численных методик включает в себя различные этапы: проверку отдельных блоков программы, решение тестовых задач и сопоставление с известными аналитическими решениями и результатами расчета по другим численным методикам и, наконец, на завершающей стадии — проведение численного моделирования конкретных натурных и крупномасштабных экспериментов. В книге приведены результаты сопоставления расчетных и экспериментальных данных по ряду опытов, которые, помимо обоснования численных методик, имеют и самостоятельное научное значение.

## ГЛАВА 1

# ОСНОВНЫЕ ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ МЕХАНИЧЕСКОЕ ДЕЙСТВИЕ ЯДЕРНОГО ВЗРЫВА

В настоящей книге термином «механическое действие ядерного взрыва» обозначена совокупность механических процессов, формирующихся в результате действия взрыва на окружающую среду (воздух, воду, грунт) в виде газодинамических, гидродинамических и упругопластических возмущений. Механическое действие ядерного взрыва существенным образом зависит от характеристик среды, в которой происходит подрыв заряда, и от таких условий его подрыва, как энерговыделение и высота (глубина) над (под) границей раздела сред. Кроме того, при подземном взрыве механическое действие в существенной степени определяется размером камеры, в которой проводится подрыв.

### 1.1. Воздушный взрыв

Развитие ядерного взрыва начинается с момента выделения энергии в зарядном устройстве. Исторически принято энергию\* ядерного взрыва измерять в тоннах тротила, при взрыве которого выделяется такая же энергия, что и при ядерном взрыве. Считается, что ядерный взрыв энергией 1 Мт по количеству выделенной энергии эквивалентен взрыву тротила массой  $10^6$  т. Характерной особенностью ядерного взрыва является его сверхвысокая по сравнению с химическим взрывом концентрация энергии и очень короткое время ее выделения — примерно 10–100 нс. Энерговыделение ядерного зарядного устройства может быть самым различным: от 10 Мт до 0,1 т. Здесь главным образом будут рассматриваться физические процессы, сопровождающие развитие взрыва мегатонного класса.

Первоначально примерно 90 % выделившейся энергии расходуется на разогрев вещества зарядного устройства в зоне реакции. Температура вещества в этой зоне достигает примерно ста миллионов кельвинов, а давление — 1 ТПа [1]. Среда с такими параметрами представляет собой горячую сверхплотную плазму, основным носителем энергии в которой является электромагнитное (тепловое) излучение. Распределение квантов такого излучения простирается в рентгеновскую область за 10 кэВ, а в специальных случаях — и за 100 кэВ [2].

---

\*Ранее вместо термина «энергия» («энерговыделение») ядерного взрыва употребляли с тем же смыслом термин «мощность» ядерного взрыва.

Уже в процессе энерговыделения часть энергии в виде жестких квантов выходит через оболочку зарядного устройства и поглощается в окружающей среде. Для относительно мощного зарядного устройства первоначально выделившаяся энергия при взрыве передается внешней среде рентгеновским излучением. Лишь в случае зарядного устройства малой энергии определяющим механизмом передачи энергии взрыва внешней среде является разлет вещества устройства. Передача энергии воздушной среде осуществляется в режиме тепловой волны: происходит послонный прогрев вещества — излучение слабо поглощается в прогретом веществе и прогревает слой за слоем холодный воздух перед фронтом волны. Скорость распространения тепловой волны значительно опережает в начальные моменты времени скорость распространения возникающих газодинамических возмущений и, следовательно, за это время плотность вещества в области, прогретой тепловой волной (тепловой зоне), меняется слабо. Однако по мере распространения тепловой волны скорость ее падает и формирующиеся газодинамические возмущения начинают обгонять ее фронт: вперед выходит воздушная ударная волна — резкий скачок газодинамических параметров, распространяющийся со сверхзвуковой скоростью. Максимальный радиус тепловой зоны при воздушном взрыве зависит от ряда факторов: энергии взрыва и типа заряда, высоты взрыва и т.д. При взрыве на высоте менее 10 км радиус тепловой зоны  $\bar{r}_{\text{тз}} \approx 0,6 \text{ м/т}^{1/3}$ .

По мере отрыва ударной волны от тепловой основным механизмом переноса энергии от источника к внешней среде является газодинамическое движение вещества. При взрыве в воздухе ударная волна, распространяясь на большие расстояния, становится ведущим фактором механического действия взрыва. Количественные характеристики во фронте «оторвавшейся» от источника (высоконагретой центральной области) ударной волны — давление, плотность, температура, скорость движения вещества — удовлетворительно описываются моделью точечного взрыва [3, 4]. При этом оценку параметров можно проводить исходя из закона подобия, суть которого заключается в том, что при взрывах двух зарядов различной энергии  $q_1$  и  $q_2$  параметры во фронте (давление, скорость движения фронта, плотность вещества, температура, скорость звука и др.) будут иметь одинаковые значения на одинаковых приведенных расстояниях  $\bar{r} = r_1/q_1^{1/3} = r_2/q_2^{1/3}$ .

Учитывая характерный для ядерного взрыва масштаб явления (километры и более), даже при взрыве в воздушной среде ее нельзя считать однородной. Для такого масштаба необходимо считаться с неоднородностью реальной атмосферы: наличием в ней ветровых градиентов, градиентов по температуре и плотности, концентрации влаги и т.д. Начиная с некоторого момента после взрыва проявляются различия в параметрах волны для разных направлений распространения. При этом движение волны вверх от взрыва происходит с большей скоростью, а вниз — с меньшей, и первоначальная сферическая форма границы возмущенной области постепенно трансформируется в вытянутое вдоль вертикальной оси тело вращения.

## 1.2. Подземный взрыв

Выделение энергии в заряде и первоначальная передача ее внешней среде при подземном взрыве происходит так же, как и при взрыве в воздухе. Выделяемая энергия в заряде передается внешней среде путем прогрева ее рентгеновским излучением. По грунту распространяется тепловая волна, а начиная с некоторого расстояния вперед выходит ударная волна. При подземном взрыве с плотным окружением заряда грунтом, вследствие большей на три порядка плотности грунта по сравнению с плотностью воздуха, максимальный размер области тепловой волны (тепловой зоны) составляет всего  $0,015-0,02 \text{ м/т}^{1/3}$  [5].

Ударная волна в грунте, в отличие от ударной волны в воздухе, является неустойчивой. В результате полиморфных фазовых переходов и специфических связей между напряжениями и деформациями начиная с некоторого расстояния она трансформируется в волну сжатия с непрерывным распределением параметров. Радиус области существования ударной волны при подземном взрыве составляет примерно  $0,3 \text{ м/т}^{1/3}$ . На границе зоны существования ударной волны при взрыве в скальной породе давление во фронте волны составляет примерно 40 ГПа. Внутри зоны ударной волны, вследствие высокого давления и температуры вещества, происходят процессы полной ионизации (при давлении на фронте более 1 ТПа), испарения (давление более 100 ГПа), плавления (давление более 50 МПа), полиморфных фазовых переходов (давление более 10 МПа) [1]. Испаренный грунт здесь играет такую же роль, как продукты взрыва при подземном взрыве химического взрывчатого вещества. В процессе расширения испаренного грунта и образовавшихся в результате химических реакций газообразных продуктов формируются полость взрыва и сейсмозрывные волны. К концу расширения взрывной полости давление газов в ней уравновешивается сопротивлением прочностных сил окружающего грунта и давлением массы вышележащих слоев грунтового массива. Для большинства грунтовых сред (за исключением соли и глины) полость оказывается неустойчивой: происходит обрушение кровли и заполнение полости обломками породы. Максимальный радиус полости при ядерном взрыве в горных породах составляет примерно  $0,8-1 \text{ м/т}^{1/3}$  [5].

При взрыве на большой глубине при обрушении кровли не происходит раскрытия купола и выброса газообразных продуктов из полости в атмосферу. Такой взрыв называется камуфлетным, минимальная глубина камуфлетного взрыва ориентировочно составляет  $7-10 \text{ м/т}^{1/3}$ . При взрыве на меньшей глубине происходит разрушение верхних слоев грунта, развитие купола и разлет разрушенного грунта в поле силы тяжести. Под действием давления газов полости возникает фильтрационный поток газообразных продуктов взрыва в атмосферу. Вместе с продуктами взрыва в атмосферу выходят радиоактивные вещества.

Подземный ядерный взрыв является источником интенсивных сейсмозрывных волн, количественные характеристики которых зависят от

свойств породы, в которой осуществляется взрыв, и условий подрыва зарядного устройства. В частности, существенное влияние на сейсмический эффект взрыва оказывает размер взрывной камеры, в которой происходит подрыв зарядного устройства. По отношению к размеру взрывной камеры различают два случая: плотное окружение зарядного устройства грунтом (связанный взрыв) и наличие воздушной прослойки между стенками камеры и оболочкой зарядного устройства. Последний вариант подрыва получил название декаплинга. Использование эффекта декаплинга позволяет существенно снизить сейсмическое действие подземного взрыва.

Заметное влияние на структуру волнового поля оказывает поверхность грунта. Сейсмозврывную волну при глубоких подземных взрывах обычно называют волной сжатия. В зависимости от интенсивности волны сжатия (максимальных напряжений) в результате ее действия могут происходить необратимые деформации породы вплоть до разрушения. При взаимодействии волны сжатия с дневной поверхностью (поверхностью грунта) за счет отраженной волны в приповерхностной зоне возникают растягивающие напряжения, в результате действия которых развиваются так называемые откольные явления; происходит множественный отрыв слоев, параллельных дневной поверхности, от основного массива и их движение в поле силы тяжести. Последующее схлопывание слоев между собой и с основным массивом на волновых эпюрах отражается в виде характерных сигналов всплесков ускорения грунта.

### 1.3. Взрыв вблизи поверхности грунтового массива

Параметры механического действия ядерного взрыва вблизи поверхности грунтового массива существенно зависят от высоты–глубины подрыва заряда. Причем в зависимости от высоты–глубины взрыва влияние поверхности раздела воздушной и грунтовой сред неодинаково проявляется на разных стадиях развития взрыва. Наиболее сильное влияние граница раздела сред оказывает на процессы развития взрыва на высоте  $\bar{H} \leq 0,3 \text{ м/т}^{1/3}$  и глубине менее  $0,3 \text{ м/т}^{1/3}$ . При таких условиях подрыва зарядного устройства характерным является поступление в атмосферу огромной массы выбрасываемого грунта и в то же время как в воздушной, так и в грунтовой средах развиваются интенсивные механические процессы, подобные тем, которые наблюдаются при воздушном или подземном взрывах.

Особенности развития ядерного взрыва в диапазоне указанных выше высот–глубин подрыва заряда рассмотрены на примере контактного взрыва, т.е. такого взрыва, когда зарядное устройство в момент его подрыва располагается на поверхности грунта.

Исследования механического действия воздушного и подземного взрывов показывают, что детали энерговыделения не оказывают сколько-нибудь значительного влияния на процесс развития взрыва начиная с расстояний, превышающих, например на порядок, размеры зарядного устройства. В этих случаях при математическом моделировании

действия взрыва в качестве источника можно использовать равномерное распределение термодинамических параметров в тепловой зоне. При контактном взрыве ситуация совершенно иная. Здесь уже на этапе начального энерговыделения за счет значительной разницы между оптическими характеристиками грунта и воздуха, обусловленной разницей в плотности на три порядка, происходит существенно неравномерное перераспределение энергии между воздушной и грунтовой средами. Важнейшей количественной характеристикой, определяющей механическое действие контактного ядерного взрыва на грунтовой массив, является значение энергии, передаваемой в нижнее (грунтовое) полупространство. Для мощного взрыва (взрыва заряда мегатонного класса) это значение не превышает 10 %. Причем это значение энергии уже достигается к моменту времени, сопоставимому с временем энерговыделения (примерно 100 нс). В дальнейшем, за счет переизлучения энергии обратно в воздух и выброса высоконагретой части грунта в атмосферу, доля энергии в грунтовом полупространстве уменьшается и приближается к нескольким процентам.

В процессе развития контактного ядерного взрыва формируются два основных источника механического действия на грунтовой массив. Один из них (эпицентральный источник) связан с областью высоких параметров в центральной части взрыва, сформированной в результате распространения по грунту тепловой и ударной волн, кинетического удара вещества зарядного устройства и прогрева излучением со стороны воздуха приповерхностного слоя грунта. По форме эпицентральный источник напоминает как бы перевернутую шляпу. Под действием эпицентрального источника в грунте формируется группа сейсмозрывных волн, которую обычно относят к эпицентральной волне. С увеличением глубины взрыва эпицентральная волна плавно переходит в волну сжатия подземного взрыва. Часть энергии эпицентрального источника расходуется также на образование воронки выброса и разлет грунта в атмосферу.

Другим источником воздействия контактного взрыва на грунтовой массив является распространяющаяся по поверхности воздушная ударная волна, действующая на грунт подобно расширяющемуся во времени плоскому штампу. С действием воздушной ударной волны связано формирование другой группы сейсмозрывных волн, которую обобщенно принято называть волной сжатия от воздушной ударной волны.

Вклад в сейсмозрывное действие различных источников в значительной степени зависит от места положения точки наблюдения. Под центром взрыва и в окрестности воронки выброса (на расстоянии от центра менее  $5 \text{ м/т}^{1/3}$ ) основное движение грунта связано с действием эпицентрального источника. С увеличением глубины точки наблюдения вклад волны сжатия от воздушной ударной волны возрастает, что обусловлено следующим обстоятельством. Эпицентральной волна имеет сферическую расходимость и с ростом глубины  $z$  ее амплитуда уменьшается пропорционально  $z^{-n}$ , где показатель  $n$  с расстоянием тоже уменьшается с 3 до 1. Источник,

определяемый действием воздушной ударной волны, по своим характеристикам ближе к плоскому источнику и, следовательно, связанные с ним волны с расстоянием затухают слабее, чем сферические волны.

Таким образом, роль волны сжатия от воздушной ударной волны с увеличением глубины точки наблюдения растет и на некоторой глубине становится преобладающей, однако амплитуда движения на этом расстоянии уже мала — составляет всего лишь единицы сантиметров в секунду. При контактном ядерном взрыве во всем диапазоне практически важных значений глубины под центром взрыва основной вклад в суммарное движение грунта вносит эпицентральная волна, а вклад волны сжатия в формирование амплитуды колебаний грунта не превышает  $1/3$  даже на достаточно большой глубине (около  $10 \text{ м/т}^{1/3}$ ).

Другая картина наблюдается вблизи поверхности грунтового массива. Здесь начиная с расстояний  $5 \text{ м/т}^{1/3}$  максимальные значения амплитуд волн, как правило, обусловлены действием на грунтовой массив воздушной ударной волны. Особенно это ярко выражено для приповерхностных слоев, обладающих малой прочностью.

Волновая картина в грунтовом массиве при контактном ядерном взрыве определяется не только особенностями конкурирующих между собой эпицентрального источника и воздушной ударной волны, но и строением самого грунтового массива, физико-механическими характеристиками слагаемых пород. Наиболее простое волновое движение наблюдается в грунтовом массиве, близком к однородному, или в двухслойном грунтовом массиве (слой мягкого грунта на подстилающей скале). Здесь по определенным признакам можно выделить ряд характерных волн (объемные, поверхностные, поперечные, головные и др.) и проследить закономерности изменения их параметров с расстоянием. В реальной же ситуации с учетом масштаба, характерного для ядерного взрыва, грунтовой массив представляет собой достаточно сложную среду с наличием различных неоднородностей: слои грунта с различающимися физико-механическими свойствами, изменяющейся (как правило увеличивающейся) с глубиной жесткостью породы и др. Особенно сложное строение грунтового массива имеет место в скальной породе с наличием различных тектонических нарушений типа отдельных трещин, разломов, зон трещиноватости, зон тектонических напряжений, структурных блоков различного порядка и т.д. В таких средах при анализе волновых полей уже не представляется возможным уверенно идентифицировать какой-либо определенный тип волны, и в этих случаях при исследовании закономерностей распространения сейсмозрывных волн, как правило, изучают влияние различных факторов на максимальные параметры колебаний грунта.

Из внешних проявлений контактному ядерного взрыва при действии его на грунтовой массив наиболее яркими являются образование воронки, разлет грунта в атмосферу, формирование навала грунта. Воронка выброса контактному ядерного взрыва есть результат поршневого действия



испаренного грунта из центральной части взрыва (области эпицентрального источника) и вдавливания грунта в массив воздушной ударной волной. В окрестности воронки выброса формируются зоны разрушения и наблюдаются значительные остаточные смещения грунта. Размеры зон разрушения и областей с остаточными смещениями грунта, как правило, коррелируют с геометрическими размерами воронки. При контактном взрыве энергией 1 Мт на поверхности мягкого грунта радиус воронки выброса составляет примерно 130 м, а глубина — примерно 50 м. Размер зон разрушения и сжатия грунта составляет несколько радиусов воронки.

В процессе образования воронки огромная масса грунта выбрасывается в атмосферу — при взрыве с энерговыделением 1 Мт: — приблизительно  $10^6$  т грунта. Меньшая часть выброшенного грунта попадает в светящуюся область взрыва, а затем вовлекается в облако взрыва. Большая же часть выбрасываемого грунта, двигаясь в поле силы тяжести и падая обратно на поверхность грунтового массива, участвует в формировании навала грунта.

Главные особенности развития процессов в атмосфере при контактном ядерном взрыве, в отличие от взрыва в безграничной воздушной среде, обусловлены изменением динамики поступления энергии от зарядного устройства среде, выбросом в атмосферу огромной массы грунта и наличием контактной границы грунт–воздух. Если при воздушном взрыве энергия в форме тепловой волны передается воздушной среде за время, сравнимое со временем энерговыделения, то при контактном взрыве некоторая часть энергии передается сначала грунтовому массиву и лишь затем поступает в атмосферу за счет излучения высокотемпературной части грунта, а также за счет выброса из эпицентральной области энергоемкого грунта. В итоге же, как и при взрыве в воздухе, основная часть энергии контактного ядерного взрыва оказывается сосредоточенной в верхнем полупространстве.

Отмеченные особенности развития контактного ядерного взрыва на начальной стадии приводят к неравномерному (в отличие от воздушного взрыва) распределению параметров в ближней возмущенной зоне взрыва: за счет направленного выброса грунта имеет место существенное различие в параметрах ударной волны в вертикальном и горизонтальном направлениях от взрыва. Однако со временем эти детали нивелируются, и начиная с расстояния, при котором давление во фронте ударной волны составляет примерно 10 МПа, ее параметры становятся близкими к параметрам ударной волны воздушного ядерного взрыва в безграничной атмосфере с учетом удвоенной энергии взрыва.

Безусловно, наиболее значительной особенностью ядерного взрыва вблизи поверхности грунта является резкое изменение параметров механического действия на грунтовый массив с увеличением (даже незначительным) глубины–высоты подрыва заряда.

Физически этот эффект объясняется достаточно просто. Как уже отме-

чалось, при контактном ядерном взрыве максимальное значение энергии, приходящейся на нижнее грунтовое полупространство, составляет не более 10 % от общей энергии взрыва. При заглублении заряда в грунт на 2-3 радиуса (примерно 1–1,5 м) первоначально все 100 % выделившейся при взрыве энергии приходятся на грунтовый массив. Затем, со временем, в процессе перераспределения энергии взрыва между воздушной и грунтовой средами большая часть энергии снова окажется в верхнем (воздушном) полупространстве. Но в процессе перераспределения энергии (время основного перераспределения энергии также резко увеличивается с глубиной подрыва зарядного устройства) над грунтом совершается значительная работа расширяющимися продуктами взрыва, что и приводит к усилению механического действия взрыва на грунтовый массив.

Фактически при заглублении заряда в грунт резко увеличивается интенсивность эпицентрального источника, а следовательно, и связанные с ним такие факторы, как параметры эпицентральной волны, размеры воронки выброса, размеры зон разрушения породы и др. Заглубление зарядного устройства мегатонного класса на несколько метров приводит к увеличению интенсивности эпицентрального источника (по энергии) на порядок и более. Что касается параметров воздушной ударной волны при малозаглубленном взрыве ( $\bar{H} > -0,3 \text{ м/т}^{1/3}$ ), то за счет особенностей развития взрыва на начальной стадии и характерной для таких взрывов динамики поступления энергии в воздушное полупространство происходит резкое их уменьшение в ближней зоне взрыва. Начиная же с расстояния, на котором давление во фронте ударной волны примерно 1 МПа, они становятся близкими к соответствующим параметрам контактного ядерного взрыва.

С увеличением высоты подрыва заряда возникает обратная ситуация, интенсивность эпицентрального источника в этом случае резко падает и при взрыве на высоте  $0,3 \text{ м/т}^{1/3}$  и более единственным источником воздействия на грунтовый массив становится воздушная ударная волна.

На закономерности распространения воздушной ударной волны при ядерном взрыве вблизи поверхности грунта так же, как и при воздушном взрыве, заметное влияние оказывают неоднородности (градиенты плотности, температуры и др.) реальной атмосферы. Кроме того, при таком взрыве возникают особенности, связанные с отражением ударной волны от границы раздела воздух–грунт. В зависимости от высоты и энергии взрыва существуют два режима отражения: регулярное и нерегулярное [6]. В области нерегулярного (маховского) отражения газодинамическое течение в окрестности фронта имеет сложный характер, параметры такого течения существенно зависят от значения давления во фронте падающей волны.

Обычно при решении задачи взаимодействия воздушной ударной волны с границей раздела поверхность грунта принимается абсолютно жесткой. Однако для некоторых случаев такое приближение становится неприемлемым, и в частности, в том случае, когда до подхода ударной волны за

счет прогрева излучением поверхности грунта в приповерхностной области образуется нагретый приземный слой. Эпюра волны в этих условиях искажается за счет большей скорости звука в прогретом приземном слое, чем в холодном воздухе, образуется характерный для этого случая предвестник, изменяются количественные характеристики волны [6]. Это явление принято называть аномалией ударной волны, наиболее выражено оно при летних условиях взрыва.

#### 1.4. Взрыв у входа в протяженный канал

Исследование процессов распространения ударной волны в подземных выработках представляло большой научный и технический интерес еще задолго до появления проблемы, связанной с действием ядерного взрыва на протяженный канал. Особенно важное значение эти вопросы имеют для использования действия взрыва в горнодобывающей промышленности [7]. При изучении закономерностей распространения ударной волны в канале в качестве источника волны обычно использовали взрыв заряда химического взрывчатого вещества [8, 9].

Вопросы затекания и распространения тепловой и воздушной ударной волн в протяженные каналы при ядерном взрыве вблизи входа стали актуальными в связи с созданием защищенных подземных сооружений различного назначения [10]. В данной монографии рассматриваются лишь физические аспекты этого сложного явления и методы его математического моделирования.

На начальном этапе развитие мощного взрыва на входе характеризуется протеканием тех же физических процессов, что при взрыве вблизи поверхности грунтового массива, и отличается от него особенностями взаимодействия излучения и разлетающегося вещества ядерного взрывного устройства со стенками канала, воздушной и грунтовой средами [10].

Анализ основных физических процессов развития взрыва проведен на примере ядерного взрыва мегатонного класса для условия расположения зарядного устройства на оси симметрии канала.

Рентгеновское излучение, выходящее из взрывного устройства, распространяется в окружающем воздухе и уже к моменту времени примерно 100 нс достигает стенок канала. Воздух в области тепловой волны оказывается нагретым до  $10^7$  К. Поглощение рентгеновского излучения в тонком приповерхностном слое стенок канала приводит к их прогреву до температуры примерно  $10^6$ – $10^7$  К на глубину 1–10 см в зависимости от расстояния до входа в канал. Давление в прогретом слое повышается до 1–10 ТПа, происходит взрывное испарение и выброс паров вещества стенки внутрь канала. Одновременно в воздушном полупространстве происходит распространение тепловой волны, а в грунте за счет действия тепловой волны и поступления энергии из канала формируется своеобразный для таких условий подрыва зарядного устройства эпицентральный источник [10].

Взрывное испарение и разлет вещества стенок канала приводит к схло-

пыванию испаренного вещества на оси канала и после прохождения серии поперечных к оси канала волн формируется поток вещества с плотностью примерно  $10 \text{ кг/м}^3$ , давлением примерно  $100 \text{ ГПа}$  и температурой  $10^6 \text{ К}$  [10]. С ним связано формирование интенсивного осевого движения внутри канала, выброс вещества из канала в воздушное полупространство, расширение стенок канала и распространение интенсивной ударной волны в окружающем канал грунте. В дальнейшем, по мере распространения потока по каналу, движение в основном принимает одномерный (по оси канала) характер.

На дальнейший процесс распространения газодинамического потока по каналу наиболее существенное влияние оказывают диссипативные потери, обусловленные взаимодействием высокоскоростного и высокотемпературного потока со стенками канала. Эти потери, в основном, вызваны процессами абляции и вовлечения вещества стенок канала в поток турбулентными трением и теплопроводностью.

При ядерном взрыве у входа в канал, так же как и при взрыве вблизи поверхности грунтового массива, в центральной зоне взрыва формируются интенсивные сейсмозрывные волны, происходит разрушение грунта, образуется воронка выброса, в результате чего начальный участок канала оказывается разрушенным и заваленным обломками породы. В этих условиях, начиная с некоторого момента времени, значение которого зависит от энергии взрыва, характеристик канала, свойств окружающей породы и других факторов, в сохранившейся части канала образуется некоторый замкнутый объем, в котором устанавливается повышенное давление сложного по составу вещества и неравномерное распределение температуры как в объеме канала, так и его стенках. В дальнейшем спад давления и температуры до фоновых значений происходит за счет процессов фильтрации газообразных продуктов и теплопроводности. Протекание этих процессов существенно зависит от характеристик самого канала и свойств окружающей породы.

## Список литературы

1. *Зеленцов С.А., Лоборев В.М., Шилобреев Б.А.* Общая картина развития наземного взрыва. — В кн: Физика ядерного взрыва, т. 1/ Под ред. В.М. Лоборева. — М.: Изд-во МФТИ, 2000. С. 11–33.
2. *Reichert U.* Nuclear testing and a comprehensive test ban-background and issues. — Darmstadt (Germany): Inst. Kernphysik, 1989. 140 p.
3. *Седов Л.И.* Методы подобия и размерности в механике. — М.: Наука, 1967. 428 с.
4. *Зельдович Я.Б., Райзер Ю.П.* Физика ударных волн и высокотемпературных газодинамических явлений. — М.: Наука, 1966. 687 с.
5. *Архипов В.Н., Евтерев Л.С., Замышляев Б.В., Краснов С.А., Смирнов Е.И., Ушаков О.Н.* Механическое действие взрыва на грунтовые среды. — В кн: Физика ядерного взрыва, т. 1/ Под ред. В.М. Лоборева. — М.: Изд-во МФТИ, 2000. С. 159–242.
6. *Любимов Г.Н., Кузовлев В.Д., Чапурин В.М., Селиверстов И.Ю., Семенов Г.И.* Воздушная ударная волна. — В кн: Физика ядерного взрыва, т. 1/ Под ред. В.М. Лоборева. — М.: Изд-во МФТИ, 2000. С. 141–158.
7. *Гурин А.А., Малый П.С., Савенко С.К.* Ударные воздушные волны в горных выработках. — М.: Недра, 1983. 223 с.
8. *Садовский М.А., Рябинин Ю.Н., Родионов В.Н.* Распространение ударных волн в каналах. — В сб: Механическое действие взрыва/ М.: 1994. С. 174–193.
9. *Рябинин Ю.Н., Родионов В.Н., Вахрамеев Ю.С.* Затухание ударных волн в каналах постоянного сечения.— В сб: Механическое действие взрыва/ М., 1994. С. 194–202.
10. *Архипов В.Н., Бугров В.В., Кнестяпин А.М., Королев В.С., Любимов Г.Н., Макаров В.Е., Семенов Г.И., Смазнов В.В.* Затекание воздушной ударной волны в канал и замкнутый объем. — В кн: Физика ядерного взрыва, т. 2/ Под ред. В.М. Лоборева. — М.: Изд-во МФТИ, 2000. С. 25–45.
11. *Шильков А.В.* Применение уравнения переноса для исследования взаимодействия излучения с движущейся плазмой// Канд. диссертация. — М.: ИПМ им. М.В. Келдыша АН СССР, 1985.
12. *Гольдин В.Я., Гольдина Д.А., Колпаков А.В., Шильков А.В.* О моделировании задач высокотемпературной радиационной газовой динамики// Препринт № 96. — М.: ИПМ им. М. В. Келдыша АН СССР, 1984.
13. *Гольдин В.Я., Гольдина Д.А., Колпаков А.В., Шильков А.В.* Математическое моделирование газодинамических процессов при высокой плотности энергии излучения// ВАНТ, сер. Методики и программы численного решения задач математической физики. — М.: 1986. Вып. 2.
14. *Гольдин В.Я., Данилова Г.В., Четверушкин Б.Н.* Приближенный метод расчета нестационарного кинетического уравнения. — В кн: Вычислительные методы в теории переноса. — М.: Атомиздат, 1969.

15. Гольдин В.Я. Квазидиффузионный метод решения кинетического уравнения// ЖВМ и МФ. 1964. Т. 4, № 6.
16. Гольдин В.Я. Характеристическая разностная схема нестационарного кинетического уравнения// Докл. АН СССР. 1960. Т. 133, № 4.
17. Четверушкин Б.Н. Математическое моделирование задач динамики излучающего газа. — М.: Наука, 1985.
18. Головизнин В.М., Рязанов М.А., Самарский А.А., Сороковикова О.С., Чернов С.Ю. Разностные схемы газовой динамики со сбалансированными конвективными потоками. — В сб: Вычислительные методы в математической физике. — М.: Изд-во МГУ, 1986.
19. Иевлев В.М. Турбулентное движение высокотемпературных сплошных сред. — М.: Наука, 1975.
20. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика, ч. VI. Гидродинамика. — М.: Наука, 1986.
21. Белоцерковский О.М. Численное моделирование в механике сплошных сред. — М.: Наука, 1984.
22. Оран Э., Борис Дж. Численное моделирование реагирующих потоков. — М.: Мир, 1990.
23. Бочков М.В., Махвиладзе Т.М., Пекарчук С.Б., Четверушкин Б.Н. Численное моделирование травления полимеров в кислородсодержащей атмосфере// Математическое моделирование. 1989. Т. 1, № 2. С. 1–13.
24. Самарский А.А. Теория разностных схем. — М.: Наука, 1983.
25. Самарский А.А., Гулин А.В. Численные методы. — М.: Наука, 1989.
26. Теоретические основы и конструирование численных алгоритмов задач математической физики/ Под ред. К.И. Бабенко. — М.: Наука, 1979.
27. Бахрах С.М., Глаголева Ю.П., Самигулин М.С., Фролов В.Д., Яценко Н.Н., Янилкин Ю.В. Расчет газодинамических течений на основе метода концентраций// Докл. АН СССР. 1981. Т. 257, № 3.
28. Лойцянский А.Г. Механика жидкости и газа. — М.: Наука, 1970.
29. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. — М.: ИЛ, 1956. 335 с.
30. Климонтович Ю.Л. Турбулентное движение и структура хаоса: Новый подход к статистической теории открытых систем. — М.: Наука. Физматлит, 1990. 320 с.
31. Климонтович Ю.Л. Статистическая теория открытых систем. — М.: ТОО Янус, 1995. 624 с.
32. Абрамович Г.Н., Гиршович Т.А., Крашенинников С.Ю., Секундов А.Н., Смирнова И.П. Теория турбулентных струй. — М.: Наука. Физматлит, 1984. 715 с.
33. Дорренс У.Х. Гиперзвуковые течения вязкого газа. — М.: Мир, 1966. 439 с.
34. Самарский А.А., Попов Ю.В. Разностные методы решения задач газовой динамики. — М.: Наука, 1997. 424 с.
35. Гасилов В.А., Кружковский А.Ю., Оточин Ал.А., Оточин Ак.А. Полностью консервативная разностная схема в смешанных эйлерово-лагранжевых переменных для расчета аксиально симметричных МГД-течений// Препринт № 5. — М.: ВЦММ АН СССР, 1991.
36. Колдоба А.В., Повещенко Ю.А., Попов Ю.П. Двухслойные полностью консервативные разностные схемы для уравнений газовой динамики в переменных Эйлера// ЖВМ и МФ. 1987. Т. 27, № 5.
37. Годунов С.К., Забродин А.В., Иванов М.Я., Крайко А.И., Прокопов Г.П. Численное решение многомерных задач газовой динамики. — М.: Наука, 1976. 400 с.

38. Кузнецов Н.М. Термодинамические функции и ударные адиабаты воздуха при высоких температурах. — М: Машиностроение, 1965. 463 с.
39. Баум Ф.А., Орленко А.П., Станюкович К.П. и др. Физика взрыва. — М.: Наука, 1975.
40. Майнчен Дж., Сак Е. Метод расчета «ТЕНЗОР». — В сб: Вычислительные методы в гидродинамике. — М.: Мир, 1967.
41. Анучина Н.Н., Бабенко К.И., Годунов С.К. и др. Теоретические основы и конструирование численных алгоритмов задач математической физики. — М.: Наука, 1979.
42. Исследование закономерностей деформирования нарушений сплошности горного массива под действием импульсных нагрузок// Отчет по НИР ИДГ РАН, 1996.
43. Макаров В.Е. Турбулентный теплообмен высокоэнергетического потока с окружающей средой// Тр. Второй Российской национальной конференции по теплообмену. — 1998. Т. VI. С. 316–319.
44. Уилкинс Л. Расчет упругопластических течений. — В сб: Вычислительные методы в гидродинамике. — М.: Мир, 1967.
45. Мейдер Ч. Численное моделирование детонации. — М.: Мир, 1985. 215 с.
46. Замышляев Б.В., Евтерев Л.С. Модели динамического деформирования и разрушения грунтовых сред. — М.: Наука, 1990. 215 с.
47. Вовк А.А., Замышляев Б.В., Евтерев Л.С., Белинский И.В., Михалюк А.В. Поведение грунтов под действием импульсных нагрузок.— Киев: Наукова думка, 1984. 286 с.
48. Полежаев Ю.В., Юревич Ф.Б. Тепловая защита. — М.: Энергия, 1976.
49. Бронштэн В.А. Физика метеорных явлений. — М.: Наука, 1981.
50. Нигматулин Р.И. Динамика многофазных сред. Ч. II. — М.: Наука, 1987.
51. Малмуд В.Г., Попов Ю.П., Шапиро В.М. Применение полностью консервативных схем к расчету задач гидродинамики и магнитной гидродинамики// Препринт № 28. — М.: ИПМ им. М.В. Келдыша АН СССР, 1970.
52. Гамалий Е.Г., Гасилов В.А., Розанов В.Б. и др. Исследование устойчивости процесса сжатия тонких стеклянных оболочек. — В кн: Научные труды ИПМ им. М.В. Келдыша АН СССР. — М.: 1979.
53. Головизнин В.М., Рязанов М.А., Сороковникова О.С. Полностью консервативные дифференциально-разностные схемы газовой динамики в смешанных эйлерово-лагранжевых переменных// Препринт № 9. — М.: ИПМ им. М.В. Келдыша АН СССР, 1981.
54. Киржниц Д.А., Шпатаковская Г.В. Осцилляции упругих параметров вещества// ЖЭТФ, 1974. Т. 66, вып. 5. С. 1828–1843.
55. Леонтьев А.И., Обливин А.Н., Романенко П.Н. Исследование сопротивления и теплообмена при турбулентном течении воздуха в осесимметричных каналах с продольным градиентом давления// ПМТФ. 1961. № 5.
56. Яненко Н.Н. Метод дробных шагов решения многомерных задач математической физики. — Новосибирск: Наука, 1967.
57. Бахрах С.М., Мохов В.Н., Певницкий А.В., Севастьянов В.П., Тарасов В.И. Движение продуктов взрыва и стенок цилиндрического канала при сильном взрыве// Физика горения и взрыва. 1977. № 2. С. 302–305.
58. Elieser S., Ghatak A.K., Hora H. An Introduction to Equations of State: Theory and Applications. — Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1986. P. 320.
59. Фортнов В.Е., Якубов И.Т. Неидеальная плазма. — М.: Атомэнергоиздат, 1944. 367 с.

60. Бушман А.В., Канель Г.И., Ни А.Л., Фортвов В.Е. Теплофизика и динамика интенсивных импульсных воздействий. — Черногоровка: ИХФ АН СССР, 1989. 200 с.
61. Бушман А.В., Фортвов В.Е. Модели уравнения состояния вещества// УФН, 1983. Т. 140. С. 177–232.
62. Ross M. Matter under extreme conditions of temperature and pressure// Rep. Progr. Phys., 1985. V. 48. P. 1–52.
63. Замышляев Б.В., Ступицкий Е.Л., Гузь А.Г., Жуков В.Н. Состав и термодинамические функции плазмы: Справочник. — М.: Энергоатомиздат, 1984. 144 с.
64. Кормер С.Б., Фунтиков А.И., Урлин В.Д. и др. Динамическое сжатие пористых металлов и уравнение состояния с переменной теплоемкостью при высоких температурах// ЖЭТФ, 1962. Т. 42, вып. 3. С. 686–702.
65. Бушман А.В. и др. Термодинамические свойства материалов при высоких давлениях и температурах// Препринт. — Черногоровка: РИО ИХФ АН СССР, 1983. С. 48.
66. Романов Г.С., Станчиц Л.К. О расчете термодинамических параметров по полной системе уравнений Саха// Док. АН БССР, 1971. Т. 15, № 3.
67. Грязнов В.К. и др. Теплофизические свойства рабочих сред газофазного ядерного реактора. — М.: Атомиздат, 1980. 304 с.
68. Баско М.М. Уравнение состояния металлов в приближении среднего иона// ТВТ, 1985. Т. 23, № 3. С. 483–491.
69. Letter R. Temperature behavior of the Thomas–Fermi statistical model for atoms// Phys. Rev., 1955. V. 99, № 6. P. 1854–1870.
70. Калиткин Н.Н., Кузьмина Л.В. Таблицы термодинамических функций вещества при высокой концентрации энергии// Препринт № 35.— М.: ИПМ им. М.В. Келдыша АН СССР, 1975. 73 с.
71. Никифоров А.Ф., Новиков В.Г., Уваров В.Б. Использование квазиклассического приближения в модифицированной модели Хартри–Фока–Слэтера// ТВТ, 1987. Т. 25, № 1. С. 12–21.
72. Синько Г.В. Использование метода самосогласованного поля для расчета термодинамических функций электронов в простых веществах// ТВТ, 1983. Т. 2, вып. 6. С. 1041–1052.
73. Никифоров А.Ф., Уваров В.Б. Описание состояния вещества в области высоких температур на основе уравнений самосогласованного поля// Численные методы механики сплошных сред, 1973. Т. 4, № 4. С. 114–119.
74. Rozsnyai V.F. Relativistic Hartree–Fock–Slater calculations for arbitrary temperature and matter density// Phys. Rev. A, 1972. V. 5, № 3. P. 1137–1149.
75. Никифоров А.Ф., Новиков В.Г., Труханов С.К. и др. Расчеты уравнений состояния алюминия в области высоких температур на основе модифицированной модели Хартри–Фока–Слэтера// Препринт № 137.— М.: ИПМ им. М.В. Келдыша АН СССР, 1989. 43 с.
76. Rozsnyai V.F. An overview of the problem connected with theoretical calculations for hot plasmas// JQSRT, 1982. V. 27, № 3. P. 211–217.
77. Никифоров А.Ф., Новиков В.Г., Уваров В.Б. Применение модифицированной модели Хартри–Фока–Слэтера для расчета уравнений состояния вещества// ВАНТ. Сер. Методики и программы численного решения задач математ. физики, 1979. Вып. 4(6). С. 27–35.
78. Кузьменков Е.А., Шпатаковская Г.В. Самосогласованная квазиклассическая термодинамика невырожденной плазмы// Препринт № 93.— М.: ИПМ им. М.В. Келдыша АН СССР, 1985. 31 с.



79. Андрияш А.В., Симоненко В.А. Оценка влияния оболочечных эффектов на термодинамические свойства веществ// ВАНТ, сер. Теоретическая и прикладная физика, 1984. Вып. 2(2). С. 52–59.
80. Елисеев Г.М., Клишишов Г.Е. Уравнение состояния твердых веществ и его сплайн-аппроксимация// Препринт № 173. — М.: ИПМ им. М.В. Келдыша АН СССР, 1982. 21 с.
81. Куропатенко В.Ф., Минаева И.С. Уравнение состояния некоторых металлов// Численные методы механики сплошной среды, 1982. Т. 13, № 6. С. 69–76.
82. Сапожников А.Т., Першина А.В. Полуэмпирическое уравнение состояния металлов в широком диапазоне плотностей и температур// ВАНТ, сер. Методики и программы численного решения задач математической физики, 1979. Вып. 4(6). С. 47–56.
83. Trainor K.S. Construction of a wide-range tabular equation of state for copper// J. Appl. Phys., 1983. V. 54, № 5. P. 2372.
84. Барышева Н.М., Жеребцов В.А., Синько Г.В. САУРС — широкодиапазонное уравнение состояния с использованием сплайн аппроксимации// ВАНТ, сер. Методики и программы численного решения задач математ. физики, 1988. Вып. 2. С. 80–84.
85. Калиткин Н.Н., Кузьмина Л.В., Ритус И.В. Квазизонная интерполяция термодинамических функций// Препринт № 30. — М.: ИПМ им. М.В. Келдыша АН СССР, 1988. 22 с.
86. Копышев В.П. О термодинамике ядер одоатомного вещества// Препринт № 59. — М.: ИПМ им. М.В. Келдыша АН СССР, 1978. 11 с.
87. Куржниц Д.А., Шпатаковская Г.В. Осцилляционные эффекты атомной структуры// ЖЭТФ, 1972. Т. 62, вып. 6. С. 2082–2086.
88. Никифоров А.Ф., Новиков В.Г., Уваров В.Б. Модифицированная модель Хартри–Фока–Слэтера для вещества с заданной температурой и плотностью// ВАНТ, сер. Методики и программы численного решения задач математ. физики, 1979. Вып. 4(6). С. 16–26.
89. Никифоров А.Ф., Новиков В.Г., Орлов Н.Ю. и др. Применение модифицированной модели Хартри–Фока–Слэтера для расчета уравнений состояния вещества и коэффициентов поглощения света// Препринт № 172. — М.: ИПМ им. М.В. Келдыша АН СССР, 1979. 26 с.
90. Новиков В.Г. Модели самосогласованного поля с квазиклассическим приближением// Препринт № 69. — М.: ИПМ им. М.В. Келдыша АН СССР, 1984. 19 с.
91. Новиков В.Г. Ударное сжатие лития, алюминия и железа по модели МФХС// Препринт № 133. — М.: ИПМ им. М.В. Келдыша АН СССР, 1985. 27 с.
92. Новиков В.Г. Вычисление вклада ионов в уравнение состояния вещества на основе модели заряженных твердых сфер// Препринт № 33. — М.: ИПМ им. М.В. Келдыша АН СССР, 1986. 15 с.
93. Cowan R.D. The theory of atomic structure and spectra// Berkley University of California press, USA, 1981. P. 731.
94. Калиткин Н.Н., Кузьмина Л.В. Метод расчета ударных адиабат// Препринт № 159. — М.: ИПМ им. М.В. Келдыша АН СССР, 1988. 24 с.
95. Никифоров А.Ф., Новиков В.Г., Уваров В.Б. Влияние оболочечной структуры атомов на ударные адиабаты алюминия и железа// Препринт № 35. — М.: ИПМ им. М.В. Келдыша АН СССР, 1982. 15 с.

96. *McQueen R.G., Marsh S.P., Taylor J.W., Fritz J.N., Carter W.J.* In: High velocity impact phenomena/ Ed. R. Kinslow. — N.Y.: Academic Press, 1970. P. 293–417; appendics on p. 515–568.
97. *Аврорин Е.Н., Водолага Б.К., Симоненко В.А. и др.* Мощные ударные волны и экстремальные состояния вещества. — М.: ИВТАН, 1990. 76 с.
98. *Альтшулер Л.В.* Применение ударных волн в физике высоких давлений// УФН, 1965. Т. 85, № 2. С. 197–258.
99. *Duwall G.E., Graham R.A.* // Rev. Modern Phys., 1977. V. 49. P. 523.
100. *Трунин Р.Ф.* Ударная сжимаемость конденсированных веществ в мощных ударных волнах подземных ядерных взрывов// УФН, 1994. Т. 164, № 11. С. 1215–1237.
101. Сб: Свойства конденсированных веществ при высоких давлениях и температурах/ Под ред. Р.Ф. Трунина. — ВНИИЭФ, 1992.
102. *Трунин Р.Ф., Подурец М.А., Симаков Г.В. и др.* Экспериментальная проверка модели Томаса–Ферми для металлов при высоких давлениях// ЖЭТФ, 1972. Т. 62, № 3. С. 1043–1048.
103. *Альтшулер Л.В., Моисеев Б.Н., Попов Л.В. и др.* // ЖЭТФ 1968. Т. 54. С. 785.
104. *Трунин Р.Ф., Симаков Г.В., Подурец М.А. и др.* // Изв. АН СССР, сер. Физика Земли, 1971. Т. 1. С. 13.
105. *Владимиров А.С., Волошин Н.П., Ногин В.Н. и др.* // Письма ЖЭТФ, 1984. Т. 39. С. 69.
106. *Аврорин Е.Н., Водолага Б.К., Волошин Н.П. и др.* // ЖЭТФ 1987. Т. 93. С. 613.
107. *Tillotson J.H.* Metallic equations of state for hypervelocity impact// General Atomic Repot GA-3216, 1962.
108. *Вукалович М.П., Новиков И.И.* Уравнение состояния реальных газов. — М.-Л.: Госэнергоиздат, 1948.
109. *Бретинайдер С.* Свойства газов и жидкостей. Пер. с польск/ Под ред. П.Г. Романова. — М.-Л.: Химия, 1966.
110. *Beattie J.A., Bridgeman O.C.* // J. Amer. Chem. Soc. 1927. V. 49, № 7. P. 1665–1667.
111. *Benedict N., Webb G.B., Rubin L.C.* // J. Chem. Phys., 1940. V. 8, № 4. P. 334–345.
112. *Бушман А.В., Ломоносов И.В., Фортвов В.Е.* Уравнение состояния металлов при высоких плотностях энергии. — Черногоровка: ИХФЧ АН СССР, 1992. 196 с.
113. *Фок В.А.* Начала квантовой механики. — М.: Наука, 1976. 376 с.
114. *Кулагин Н.А., Свиридов Д.Т.* Методы расчета электронных структур свободных и примесных ионов. — М.: Наука, 1986. 278 с.
115. *Киржниц Д.А.* Полевые методы теории многих частиц. — М.: Госатомиздат, 1963. 342 с.
116. *Matzubara T.* A new approach to quantum-statistical mechanics// Prog. of Theoret. Phys, 1955. V. 14, № 4. P. 351–378.
117. *Feynman R., Metropolis N., Teller E.* Equations of state of elements based on the generalized Fermi–Thomas theory// Phys. Rev. 1949. V. 75, № 10. P. 1561–1573.
118. *Калиткин Н.Н.* Модель атома Томаса–Ферми с квантовыми и обменными поправками// ЖЭТФ, 1960. Т. 38, вып. 5. С. 1534–1540.
119. *Киржниц Д.А.* Квантовые поправки к уравнению Томаса–Ферми// ЖЭТФ, 1957. Т. 32, вып. 1. С. 115–123.

120. *Киржниц Д.А.* О границах применимости квазиклассического уравнения состояния вещества // ЖЭТФ, 1958. Т. 35, вып. 6. С. 1545–1557.
121. *Киржниц Д.А., Лозовик Ю.Е., Шпатаковская Г.В.* Статистическая модель вещества // УФН, 1975. Т. 117, вып. 1. С. 3–47.
122. *Иосилевский И.Л., Грязнов В.К.* О сравнительной точности термодинамического описания свойств газовой плазмы в приближениях Томаса–Ферми и Саха // ТВТ, 1981. Т. 19, вып. 6. С. 1121–1126.
123. *Никифоров А.Ф., Новиков В.Г., Уваров В.Б.* Модифицированная модель Хартри–Фока–Слэтера и ее применение для получения уравнений состояния вещества в области высоких температур. — В кн: Математическое моделирование. Физико-химические свойства вещества. — М.: Наука, 1989. С. 162–196.
124. Теория неоднородного электронного газа / Под ред. С. Лундквиста и Н. Марча. — М.: Мир, 1987. 400 с.
125. *Франк-Каменецкий Д.А.* Физические процессы внутри звезд. — М.: Физматгиз, 1959. 543 с.
126. *Palmer R. G., Weeks J. D.* Exact solution of the mean spherical model for charged hard spheres in a uniform neutralizing background // J. Chem. Phys., 1973. V. 58, № 10. P. 4171–4174.
127. *Hansen J. P.* Statistical mechanics of dense ionized matter equilibrium properties of the classical one component plasma // Phys. Rev. A, 1973. V. 8, № 6. P. 3096–3109.
128. *Глушак Б.Л., Гударенко Л.Ф., Стяжкин Ю.М.* Полуэмпирическое уравнение состояния металлов с переменной теплоемкостью ядер и электронов // ВАНТ, сер. Математическое моделирование физических процессов, 1991. Вып. 2. С. 57–62.
129. SESAME'83: Report on the Los Alamos equation of state Library. T4-Group, Los Alamos Nat. Lab. Report № LANL-83-4, N.M, Los Alamos. 1983.
130. *Симоненко В.А., Волошин Н.П., Владимиров А.С. и др.* // ЖЭТФ, 1985. Т. 88. С. 1452.
131. *Альтшулер Л.В., Крупников К.К., Лебедев Б.И., Жучихин В.И., Бражник М.И.* Динамическая сжимаемость и уравнение состояния железа при высоких давлениях // ЖЭТФ, 1958. Т. 34. С. 874.
132. *Альтшулер Л.В., Кормер С.Б., Баканова А.А., Трунин Р.Ф.* Уравнения состояния алюминия, меди и свинца для области высоких давлений // ЖЭТФ, 1960. Т. 38, вып. 3. С. 790–798.
133. *Трунин Р.Ф., Подурец М.А., Симаков Г.В. и др.* // ЖЭТФ, 1969. Т. 56. С. 1172.
134. *Волчинская М.И., Гольдин В.Я., Гольдина Д.А. и др.* Газодинамическая схема интегрирования плотности // Препринт № 116. — М.: ИПМ им. М.В. Келдыша АН СССР, 1979.
135. *Калиткин Н.Н., Кузьмина Л.В.* Программа расчета теплофизических свойств веществ ТФП 1–6 // Препринт № 153. — М.: ИПМ им. М.В. Келдыша АН СССР, 1984. 20 с.
136. *Альтшулер Л.В., Крупников К.К., Бражник М.И.* Динамическая сжимаемость металлов при давлениях от четырехсот тысяч до четырех миллионов атмосфер // ЖЭТФ, 1958. Т. 34. С. 886.
137. *Альтшулер Л.В., Баканова А.А., Трунин Р.Ф.* Ударные адиабаты и нулевые изотермы семи металлов при высоких давлениях // ЖЭТФ, 1962. Т. 42. С. 91.
138. *Калиткин Н.Н., Кузьмина Л.В.* Квантово-статистические ударные адиабаты пористых веществ // Математическое моделирование, 1998. Т. 10, № 7. С. 111.

139. Бобровский С.В., Гоголев В.М., Замышляев Б.В. и др. Скорость откола в твердой среде под действием сильной ударной волны// ФГВ, 1974. Т. 10, № 6. С. 891–898.
140. Ликальтер А.А. Взаимодействие атомов с электронами и ионами в плазме// ЖЭТФ. 1969. Т. 56, вып. 1. С. 240–245.
141. Калиткин Н.Н. Квазизонное уравнение состояния// Математическое моделирование, 1989. Т. 1, № 2. С. 64–108.
142. Замышляев Б.В., Менжулин М.Г. Интерполяционное уравнение состояния воды и водяного пара// ПМТФ, 1971. № 3. С. 113–121.
143. Бобровский С.В., Гоголев В.М., Менжулин М.Г., Ложкина В.П. Интерполяционная термодинамическая модель для воды в области однородных и двухфазных состояний// ПМТФ, 1978. № 5. С. 130–139.
144. Коваленко Г.В., Сапожников А.Т. Табличное уравнение состояния воды// ВАНТ, сер. Методики и программы численного решения задач мат. физики/ ЦНИИ Атоминформ, 1979. Вып. 4(6). С. 40–46.
145. Гударенко Л.Ф., Жеребцов В.А. Интерполяционное уравнение состояния воды и водяного пара// ВАНТ, сер. Математическое моделирование физических процессов, 1994. № 3. С. 56–64.
146. Вуклович М.П., Ривкин С.Л., Александров А.А. Таблицы термодинамических свойств воды и водяного пара. — М.: Изд-во стандартов, 1969.
147. Ломакин Б.Н., Фортвов В.Е. Уравнение состояния идеальной цезиевой плазмы// ЖЭТФ, 1972. Т. 63, вып. 1(7). С. 92–103.
148. Сеченов В.А., Щекотов О.Е. Сравнение экспериментальных и расчетных термодинамических параметров сильно неидеальной цезиевой плазмы// ТВТ, 1974. Т. 12, вып. 3. С. 652–654.
149. Бушман А.В., Ломакин Б.Н., Сеченов В.А. и др. Термодинамика неидеальной плазмы цезия// ЖТФ, 1975. Т. 69, вып. 5(11). С. 1624–1633.
150. Волокитин В.С. Расчет термодинамики и состава неидеальных газоплазменных смесей// Препринт № 14 — М.: ВЦММ АН СССР, 1991.
151. Калиткин Н.Н., Ритус И.В., Шпатаковская Г.В. Статистические суммы атомов и ионов в плазме// Препринт № 98. — М.: ИПМ им. М.В. Келдыша АН СССР, 1981.
152. Волокитин В.С., Калиткин Н.Н. Статистические суммы водородноподобных ионов// Препринт № 11. — М.: ВЦММ АН СССР, 1991.
153. Бобровский С.В., Гоголев В.М., Ложкина В.П. О влиянии гидродинамического приближения для описания динамической сжимаемости многокомпонентных сред// ПМТФ, 1982. № 6. С. 83–88.
154. Буткович Т.Р. Газовое уравнение состояния для природных материалов/ В сб: Расчет взрывов на ЭВМ: Подземные взрывы. — М.: Мир, 1975. С. 135–161.
155. Carson T.R., Mayers D.F., Stibbs D.W.N. The calculation of stellar radiative opacity// Mon. Not. R. Astr. Soc., 1968. V. 140. P. 483.
156. Никифоров А.Ф., Уваров В.Б. Вычисление непрозрачности звезд с учетом поглощения света в спектральных линиях// ДАН СССР, 1970. Т. 191, № 1. С. 47–49.
157. Rozsnyai B.F. An overview of the problem connected with theoretical calculations for hot plasmas// JQSRT, 1982. V. 27, № 3. P. 211–217.
158. Rose S.J. Calculations of the radiative opacity of laserproduced plasmas// J. Phys. B., 1992. V. 25. P. 1667.
159. Драгалов В.В., Никифоров А.Ф., Новиков В.Г. и др. Статистический метод расчета поглощения фотонов в плотной высокотемпературной плазме// Физика плазмы, 1990. Т. 16, вып. 1. С. 77.

160. Huebner W.F., Merts A.L., Magee N.H., Argo M.F. Astrophysical opacity library// LA-6760-M. 1977.
161. Minguez E., Gamez M.L. Analysis of the atomic physics models for the multigroups opacities calculation // Lazer and Partical Beams. V. 8, № 1–2. P. 103–131.
162. Blenski T., Ligou J. Average atom calculations of radiation opacities for gold at high density and temperature// J. Physique, 1988. V. 49. P. 259.
163. Tsakiris G.D., Eidmann K. An approximate method for calculating Planck and Rosseland mean opacities in hot dense plasmas// JQSRT, 1987. V. 38, № 5. P. 353–368.
164. Новиков В.Г., Никуфоров А.Ф., Уваров В.Б. и др. О поглощении фотонов в высокотемпературной плазме// Препринт № 17. — М.: ИПМ им. М.В. Келдыша АН СССР, 1992. 29 с.
165. Cowan R.D. The theory of atomic structure and spectra. — Berkley Univ. California Press. USA, 1981. P. 731.
166. Кобзев Г.А., Нужный В.А. Спектральные и интегральные оптические характеристики непрерывного спектра воздушной плазмы при высоких температурах// Препринт № 131. — М.: ИВТ АН СССР, 1984.
167. Кобзев Г.А., Нужный В.А. Оптические свойства воздушной плазмы с учетом спектральных линий,  $T=20\,000\text{--}300\,000\text{ K}$ // Препринт № 1-134. — М.: ИВТ АН СССР, 1984. 56 с.
168. Суржиков С.Т. Вычислительный эксперимент в построении радиационных моделей механики излучающего газа. — М.: Ин. прикл. мех. РАН, 1992. 157 с.
169. Новиков В.Г. Учет индивидуальных состояний ионов в модифицированной модели Харти–Фока–Слэтера// ТВТ, 1992. Т. 30, № 4. С. 701.
170. Новиков В.Г. Модели самосогласованного поля с квазиклассическим приближением// Препринт № 69. — М.: ИПМ им. М.В. Келдыша АН СССР, 1984. 19 с.
171. Собельман И.И. Введение в теорию атомных спектров. — М.: Физматгиз, 1963. 640 с.
172. Драгалов В.В. Расчет коэффициентов электронной теплопроводности плазмы с помощью модифицированной модели Хартри–Фока–Слэтера// Препринт № 161. — М.: ИПМ им. М.В. Келдыша АН СССР, 1984. 28 с.
173. Замышляев Б.В., Евтерев Л.С., Кривошеев С.Г. Об уравнении состояния горных пород при взрывных нагрузках// ДАН СССР, 1980. Т. 251, № 2. С. 322–326.
174. Замышляев Б.В., Евтерев Л.С., Чернейкин В.А. Релаксационное уравнение состояния мягких грунтов // ДАН СССР, 1981. Т. 261, № 5. С. 1126–1130.
175. Замышляев Б.В., Евтерев Л.С., Пилипко Ю.В. Квазиупругая модель деформирования скальных грунтов // ДАН СССР, 1982. Т. 264, № 2. С. 326–329.
176. Замышляев Б.В., Евтерев Л.С., Кривошеев С.Г., Пилипко Ю.В. Модель динамического деформирования и разрушения массивов горных пород // ДАН СССР, 1987. Т. 293, № 3. С. 568–571.
177. Григорян С.С. Об основных представлениях динамики грунтов// ПММ, 1960. Т. 24, вып. 6. С. 1057–1072.
178. Фингер М., Ли Е. и др. Влияние элементарного состава на детонационные свойства ВВ/ В сб: Детонация и взрывчатые вещества. — М.: Мир, 1981.
179. Larson D.B. Inelastic Wave Propagation in Sodium Chloride// Bulletin of the Seismological Society of America, 1982. V. 72, № 6. P. 2107–2130.
180. Perret W.R., Bass R.C. Free-field Ground Motion Induced by Underground Explosions// SAND-74-0252, 1975.

181. *Адушкин В.В., Спивак А.А., Куликов В.И., Андрушин И.А., Чернышев А.К.* К проблеме уклонения от контроля при проведении подземных ядерных взрывов. Препринт — М.: 1995. 41 с.
182. *Wagner M., Goerke W., Kreyenhagen K.* Analysis of Ground Motions from Contained Bursts in Greenstone Basalt// DNA 34-18F, 1974.
183. *Trembly L.D., Berg J.W.* Amplitudes and energies of primary seismic waves near the Hardhat, Haymaver and Shoal nuclear explosions// Bull. Seism. Society Am., 1966. V. 56, № 13.
184. *Michand L.* Mechanical Effects Beyond the Close-in Zone of an Underground Nuclear Explosion// UCRL-Trans.-10616-2, 1970.
185. *Murrel D.W.* «Prairie Flat», Ground displacement study// AD 875778, 1970.
186. *Murrel D.W.* Operation «Prairie Flat», Project LN302: Earth Motion and Stress Measurements// AD 738188, 1972.
187. *Hadola P.F.* Effect of Constitutive Properties of Earth Media on Outrunning Ground Shock from large Explosions// AD 768176, 1973.
188. *Crowley B.K., Glenn H.D., Marks R.E.* An analyses of Marvel — nuclear shock tube experiment// J. Geophys. Res., 1971. V. 76. P. 3356–3374.
189. *Edwin J. Martin, Richard H. Rowland.* Castle series// 1954. P. 246–267. См. также <http://www.fas.org/nuke/hew/usa/tests/castle.html>. 21.09.2001.
190. *Азаров В. Н., Выскребенцев А. И., Кострыкин В. С., Сомов М. В.* Светящаяся область и световое излучение — В кн: Физика ядерного взрыва, т. 1./ Под ред. В.М. Лоборева. — М.: Из-во МФТИ, 2000. С. 120–140.
191. *Азаров В.Н., Выскребенцев А.И., Гузь А.Г., Сомов М.В.* Развитие высотного ядерного взрыва — В кн: Физика ядерного взрыва, т. 1./ Под ред. В.М. Лоборева. — М.: Из-во МФТИ, 2000. С. 357–367.
192. *Седов Л.И.* Распространение сильных взрывных волн// ПММ. 1946. Т. 10, вып. 2.
193. *Bethe H.A., Fuchs K., von Neumann J., Peierls R. and Penney W.G.* Shock hydrodynamics and blast waves// AECD 2860, 1944.
194. *Brinkley S.R. and Kirkwood J. G.* Theory of the propagation of shock waves// Phys. Rev. 1947. V. 71, p. 606.
195. *Taylor G. I.* The formation of a blast wave by a very intense explosio// Proceedings Roy. Soc. 1950. V. A201, p. 159.
196. Взрывные явления. Оценка и последствия. Кн. 1. Пер. с англ. Бейкер У., Кокс П., Уэстайн П. и др. Под ред. Я.Б. Зельдовича, Б.Е. Гельфанда. — М.: Мир, 1986. 319 с.
197. *Брод Г.* Расчет взрывов на ЭВМ. Газодинамика взрывов. Пер. с англ. под ред. В.Н. Николаевского. — М.: Мир, 1976.
198. *Кестенбойм Х.С., Росляков Г.С., Чудов Л.А.* Точечный взрыв. — М.: Наука, 1974. 255 с.
199. *Годунов С.К.* Разностный метод численного расчета разрывных решений уравнений гидродинамики// Математический сборник. 1959. Т. 47, вып. 3.
200. Атмосфера стандартная. Параметры. ГОСТ 4401-81. — М.: Изд-во стандартов, 1981. 179 с.
201. *Садовский М.А.* Механическое действие воздушных ударных волн по данным экспериментальных исследований — В кн: Механическое действие взрыва. — М.: УД МИД РФ, 1994. С. 7–102.
202. *Адушкин В.В.* О формировании ударной волны и разлете продуктов взрыва в воздухе — В кн: Механическое действие взрыва. — М.: УД МИД РФ, 1994. С. 225–232.
203. Proceedings of the Third Plowshare Simposium. — Washington, 1964.

204. Symposium on engineering with nuclear explosives. — Las Vegas, Nevada, 1970.
205. *Киреев В.В., Ершов Н.Н., Протопопов Д.Д.* Промышленные ядерные взрывы. — М.: Атомиздат, 1971. 103 с.
206. *Бакиров А.А., Бакиров Э.А., Виноградов В.Н. и др.* Применение подземных ядерных взрывов в нефтедобывающей промышленности. — М.: Недра, 1981.
207. *Родионов В.Н., Цветков В.М., Сизов И.А.* Перспективы применения ядерных взрывов в народном хозяйстве. — В сб: Взрывное дело № 77/34. — М.: Недра, 1976. С. 168–175.
208. *Родионов В.Н., Адушкин В.В., Костюченко В.Н., Николаевский В.Н., Ромашов А.Н., Цветков В.М.* Механический эффект подземного взрыва. — М.: Недра, 1971. 224 с.
209. *Нифонтов Б.И., Протопопов Д.Д., Ситников И.Е., Куликов А.В.* Подземные ядерные взрывы. — М.: Атомиздат, 1965. 160 с.
210. *Родионов В.Н., Сизов И.А., Цветков В.М.* Основы геомеханики. — М.: Недра, 1986. 303 с.
211. *Бовт А.Н., Ловецкий Е.Е. и др.* Механическое действие камуфлетного взрыва. — М.: Недра, 1993. 320 с.
212. *Адушкин В.В., Спивак А.А.* Геомеханика крупномасштабных взрывов. — М.: Недра, 1993. 320 с.
213. *Буткович Т.Р.* Газовое уравнение состояния для природных материалов. — В сб: Расчеты взрывов на ЭВМ: Подземные взрывы. — М.: Мир, 1975. С. 135–161.
214. *Мелош Г.* Образование ударных кратеров. Геологический процесс. — М.: Мир, 1994. 336 с.
215. *Броуд Г.Л.* Ядерные взрывы в подземных полостях. — В кн: Расчеты взрывов на ЭВМ. Подземные взрывы. — М.: Мир, 1975. С. 31–68.
216. *Rogers L.A.* Free-field motion near a nuclear explosion in salt. Projekt Salmon// I. Geophys. Res., 1966. V. 71, № 14.
217. *Родин Г.* Сейсмология ядерных взрывов. — М.: Мир, 1974. 190 с.
218. *Мюллер Р.А., Мерфи Дж.Р.* Сейсмические характеристики подземных ядерных взрывов. — В сб: Подводные и подземные взрывы. — М.: Мир, 1974. С. 314–329.
219. *Замышляев Б.В., Миронов И.Л., Пальмин С.А., Чижевский Г.В.* Ударная волна в воде. — В кн: Физика ядерного взрыва, т. 1/ Под ред. В.М. Лоборева. — М.: Изд-во МФТИ, 2000. С. 472–492.
220. *Кот К.А.* Мощные подводные взрывы. — В кн: Подводные и подземные взрывы. — М.: Мир, 1974.
221. *Minao Kamegai* Computer simulation of underwater nuclear events// Lawrence Livermore National Lab., UCID-20697, 1986.
222. *Snay H.G., Butler J.F., Gleyzal A.N.* Operation wigwam, predictions of underwater explosion phenomena// WT-1004 (NOLR-1213), 1957.
223. *Aronson C.J. et al.* Operation wigwam, underwater free-field pressures to just beyond jarget locations// WT-1005 (NOLR-1215), 1957.
224. *Ривкин С.Л., Александров А.А.* Термодинамические свойства воды и водяного пара. Справочник. — М.: Энергоатомиздат, 1984.
225. *Бобровский С.В., Гоголев В.М., Замышляев Б.В. и др.* Интерполяционное уравнение состояния для сланца и его приложение к исследованию скорости откола при сильных ударных волнах// Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 1976. № 2.

226. *Архипов В.Н., Валько В.В., Макаров В.Е., Ушаков О.Н.* Взрыв вблизи дна водоема// Тр. Первой Российской национальной конференции по тепломассообмену. Т. 9. Радиационный и сложный теплообмен. — М.: Изд-во МЭИ, 1994. С. 27–32.
227. *Lutzky M., Lehto D.L.* Shock propagation in spherically symmetric exponential atmospheres// Phys. Fluids, 1968. V. 11, № 7. P. 1466.
228. *Баженова Т.В., Гвоздева Л.Г.* Нестационарные взаимодействия ударных волн. — М.: Наука, 1977. 274 с.
229. *Белоцерковский О.М., Андрущенко В.А., Шевелев Ю.Д.* Динамика пространственных вихревых течений в неоднородной атмосфере. — М.: Янук-К, 2000. 455 с.
230. *Ляв А.* Математическая теория упругости. — М.-Л.: ОНТИ, 1935.
231. *Смирнов В.И., Соболев С.Л.* О применении нового метода к изучению упругих колебаний// Тр. СИ АН СССР, 1933. № 29
232. *Соболев С.Л.* Некоторые вопросы теории распространения колебаний. — В кн: Франк Ф., Мизес Р. Дифференциальные и интегральные уравнения математической физики. — М.-Л.: ОНТИ, 1937.
233. *Зволинский Н.В.* Отраженные и головные волны, возникающие на плоской границе раздела упругих сред// Изв. АН СССР. Сер. геофизическая, 1957. № 10. 1958. № 1 и 2.
234. *Зволинский Н.В.* Многократное отражение упругих волн в слое// Труды геофизического института, 1954. № 22 (149).
235. *Зволинский Н.В.* Волновые задачи в теории упругой непрерывной среды// Изв. АН СССР. Механика, 1965. № 1.
236. *Петрашень Г.И.* О задаче Лэмба в случае упругого полупространства// ДАН СССР, 1949. Т. 64, № 5.
237. *Огурцов К.И., Петрашень Г.И.* Динамические задачи для упругого полупространства в случае осевой симметрии// Ученые записки ЛГУ, 1951. № 149, вып. 24.
238. *Петрашень Г.И., Марчук Г.И., Огурцов К.И.* О задаче Лэмба в случае полупространства// Ученые записки ЛГУ, 1950. № 135, вып. 21.
239. *Шемякин Е.И.* Об одном методе интегрирования граничных нестационарных линейных задач о распространении возмущений в нелинейно-упругих средах// ПММ, 1958. Т. 22, вып. 3.
240. *Шемякин Е.И.* Динамические задачи теории упругости и пластичности. — Новосибирск: Изд-во НГУ, 1968.
241. *Никифоровский В.С., Шемякин В.И.* Динамическое разрушение твердых тел. — Новосибирск: Наука, 1979.
242. *Слепян Л.И.* Нестационарные упругие волны. — Л.: Судостроение, 1972.
243. *Купер Г., Сауэр Ф.* Движение грунта, связанное с образованием воронки, и приложения к масштабному приведению размеров воронок. — В сб: Удар, взрыв и разрушение. — М.: Мир, 1981. С. 41–80.
244. *Белоусов В.В.* Основные вопросы геотектоники. — М.: Госгеолтехиздат, 1954.
245. *Брезовских Л.М.* Волны в слоистых средах. — М.: Наука, 1973.
246. *Кочарян Г.Г.* Модель необратимого деформирования горного массива блочной структуры при взрывном воздействии. — В сб: Действие взрыва в неоднородной среде. Взрывное дело. № 90/47. М.: Недра, 1990.
247. *Адушкин В.В., Спивак И.А.* Расчетная модель взрывного деформирования твердой среды со структурой. — В сб: Действие взрыва в неоднородной среде. Взрывное дело. № 90/47. М.: Недра, 1990.



248. Садовский М.А., Костюченко В.Н. О затухании сейсмических волн взрыва в массиве горных пород// ДАН СССР, 1988. Т. 301, № 6. С. 1344–1347.
249. Будков А.М., Кочарян Г.Г., Погорецкий А.В. Особенности диагностики нарушений сплошности горного массива отраженными волнами. — В сб: Физические процессы в геосферах при сильных возмущениях. — М.: 1996. С. 103–110.
250. Адушкин В.В., Будков А.М., Костюченко В.Н., Кочарян Г.Г., Погорецкий А.В. Об одном типе сейсмических волн, распространяющихся в среде, содержащей протяженные структурные нарушения// ДАН, 1998. Т. 358, № 1.
251. Будков А.М., Костюченко В.Н., Кочарян Г.Г., Погорецкий А.В., Рождественский В.Б. Исследования взаимодействия сейсмической волны с разломом. — В сб: Динамические процессы во внутренних и внешних оболочках Земли. — М.: 1995.
252. Могилевская С.Е., Куюнджич Б. Морфология поверхности трещин в скальных породах. — Ленинград–Белград: 1989.
253. Алексеев А.М., Джанашия С.В., Кочарян Г.Г., Кулюкин А.М. Исследование процесса деформирования приконтурной зоны выработки в блочной среде// ФТПРПИ, 1996. № 6.
254. Burton N. Predicting the behavior of underground openings in rocks// 4th Manuel Rocha Memorial Lecture. Lisbon, 1987.
255. Садовский М.А., Болховитинов Л.Г., Писаренко В.Ф. Деформирование геофизической среды и сейсмический процесс. — М.: Наука, 1987.
256. Кочарян Г.Г., Бенедик А.Л., Костюченко В.Н., Кулюкин А.М., Павлов Д.В. Создание геомеханических моделей геофизических объектов. — В сб: Физические процессы в геосферах при сильных возмущениях. — М.: 1996. С. 38–54.
257. Кочарян Г.Г., Костюченко В.Н., Кабыченко Н.В., Ладнушкин С.М. Проблема построения модели горного массива для решения задач геомеханики. — В сб: Динамические процессы в геосферах: геофизика сильных возмущений. — М.: 1994. С. 49–56.
258. Костюченко В.Н. О прохождении сейсмической волны через массив трещиноватых горных пород// ДАН СССР, 1985. Т. 285, № 2. С. 45–48.
259. Кабыченко Н.В., Костюченко В.Н., Ладнушкин С.М. Способ выявления вертикальных структурных нарушений в массиве// Патент №2062484.
260. Stonely R. Elastic waves at the surface of separation of two solids// Proc. Roy. Soc., 1924. London, A.
261. Maxwell D.E. Simple Z model of cratering, ejection, and the overturned flap// Impact and Explosion cratering. — N.Y.: Pergamon Press, 1977. P. 1003–1008.
262. Иванов Б.А. Простая модель кратерообразования// Метеоритика, 1979. Вып. 38. С. 68–75.
263. Архипов В.Н., Макаров В.Е., Смазнов В.В., Ушаков О.Н. Моделирование взаимодействия высокоэнергетического газового потока со стенками протяженного канала. Труды второй Российской национальной конференции по теплообмену. — М.: Изд-во МЭИ, 1998. Т. /,6. С. /,235–238.
264. Glenn H.D., Crowley B.K. Marvel — Nuclear Driven Shock-Tube Experiment.// J. Appl. Phys., 1970. V. 41. P. 689–697.

265. *Базрах С.М., Игнатова Л.Я., Клопов Б.А., Мешков Е.Е., Мохов В.Н., Певницкий А.В., Сараев В.А., Севастьянов В.П., Тарасов В.И.* Исследование захлопывания канала в лабораторных экспериментах и двумерных расчетах// Физика горения и взрыва, 1977. № 2. С. 296–301.
266. *Ерошенко В.М., Зайчик Л.И.* Гидродинамика и тепломассообмен на проникаемых поверхностях. — М.: Наука, 1984.
267. *Алексеев Б.В., Гришин А.М.* Физическая газодинамика реагирующих сред. — М.: Высшая школа, 1985. 464 с.

## ГЛАВА 2

# ФИЗИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ И МЕТОДЫ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

В настоящей главе представлены физические и математические модели взрывных процессов, используемые при теоретическом исследовании механического действия ядерного взрыва. Значительное внимание уделено вопросам численного моделирования начальной стадии взрыва, на которой формируются источники механического действия на воздушную и грунтовую среды. Результатом решения задачи о начальной стадии взрыва являются параметры газо- и гидродинамических процессов, используемые в качестве исходных данных при математическом моделировании последующих стадий развития взрыва: распространения ударной волны в воздухе и грунте, сейсмозрывных волн и газодинамического потока в канале. Основу математического моделирования взрывных процессов составляют численные методы механики сплошной среды.

### 2.1. Начальная стадия взрыва

Основными физическими процессами, которые необходимо корректно описывать на начальной (радиационно-газодинамической) стадии развития ядерного взрыва, являются перенос энергии излучением и сильные газодинамические течения. Вследствие высокого давления в возмущенной области взрыва можно пренебречь влиянием прочности грунта на эти процессы: поведение грунтовой среды на начальной стадии взрыва оказывается возможным описывать в рамках модели сжимаемой жидкости (гидродинамическое приближение).

#### 2.1.1. Постановка задачи

В общем случае постановка задачи о начальной стадии ядерного взрыва сводится к следующему. Энергия ядерного взрыва по определенному временному закону выделяется в области зарядного устройства или в некоторой его части. Эта энергия переходит в энергию излучения и внутреннюю энергию вещества конструкции зарядного устройства. Начальные параметры такого источника, как правило, рассчитываются исходя из средних характеристик зарядного устройства: общего энерговыделения, массы и размера\*. Выход излучения из зарядного устройства и разлет вещества

---

\* В процессе исследования начальной стадии взрыва при необходимости могут быть учтены индивидуальные характеристики ядерного зарядного устройства.

определяют в дальнейшем воздействие ядерного взрыва на окружающую среду — грунт и воздух.

Рассматриваемые физические процессы математически могут быть описаны системой уравнений радиационной газовой динамики:

$$\begin{aligned}
& \frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho \mathbf{u}) = 0, \\
& \frac{\partial(\rho \mathbf{u})}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho \mathbf{u} \otimes \mathbf{u}) = -\operatorname{grad} p^* + 2 \operatorname{div}(\mu \mathbf{D}), \\
& \frac{\partial(\rho \epsilon + U)}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho \epsilon \mathbf{u} + \mathbf{W}) = -p^* \operatorname{div} \mathbf{u} + 2\mu \mathbf{D}^2 + \rho f(\mathbf{r}, t), \\
& \frac{1}{c} \frac{\partial I}{\partial t} + \boldsymbol{\Omega} \operatorname{grad} I = \varkappa(I_p - I), \\
& U = \frac{1}{c} \int \int_{4\pi} I d\Omega d\nu, \quad \mathbf{W} = \int \int_{4\pi} I \boldsymbol{\Omega} d\Omega d\nu, \\
& p^* = p + p_{\text{из}} - \left( \xi + \frac{2}{3} \mu \right) \operatorname{div} \mathbf{u}, \\
& p = p(\rho, T), \quad \epsilon = \epsilon(\rho, T), \quad \varkappa = \varkappa(\rho, T, \nu),
\end{aligned} \tag{2.1}$$

где  $\mathbf{r}$  — вектор направления от центра взрыва,  $\mathbf{u}$  — скорость движения вещества,  $p$  — давление,  $p_{\text{из}}$  — давление излучения,  $p^*$  — эффективное давление,  $\epsilon$  — удельная внутренняя энергия,  $\xi, \mu$  — коэффициенты вязкости,  $\mathbf{D}$  — тензор скоростей деформации,  $c$  — скорость света,  $I$  — интенсивность излучения,  $I_p$  — интенсивность равновесного излучения,  $\boldsymbol{\Omega}$  — единичный вектор направления распространения излучения,  $d\Omega$  — элемент телесного угла вокруг вектора  $\boldsymbol{\Omega}$ ,  $\nu$  — частота квантов излучения,  $\varkappa$  — коэффициент поглощения излучения, учитывающий вынужденное испускание,  $U$  — плотность энергии излучения,  $\mathbf{W}$  — поток энергии излучения,  $f(\mathbf{r}, t)$  — функция, описывающая энерговыделение,  $\rho, T$  — плотность и температура вещества,  $\otimes$  — знак тензорного произведения,  $t$  — время.

Для численного моделирования процессов на начальной стадии ядерного взрыва разработаны методики, в которых применены различные приближения для описания переноса энергии излучением: в одномерных методиках — квазидиффузионный метод расчета переноса, а в двумерных — диффузионное приближение.

### 2.1.2. Одномерная методика

При численном моделировании процессов на начальной стадии ядерного взрыва обычно используются методики, в которых для переноса энергии во внешней среде рентгеновским излучением применяют одномерную сферически симметричную модель высокотемпературных радиационно-газодинамических процессов. В настоящей работе решение одномерных

задач осуществлено с использованием разработанной в ИПМ им. М.В. Келдыша АН СССР под руководством В.Я. Гольдина математической модели и численной методики расчета процессов высокотемпературной радиационной газовой динамики [11–15], включающей замкнутую систему уравнений высокотемпературной радиационной газовой динамики в квазидиффузионной форме, в которой учитываются эффекты угловой анизотропии и нестационарности излучения, спектральные закономерности процессов обмена энергией и импульсом газа с излучением, движение источника излучения, эффект комптоновского рассеяния излучения на свободных электронах и др.

Математическая модель процессов высокотемпературной радиационной газовой динамики, характерных для начальной стадии мощного взрыва, в сферически симметричном случае может быть записана в следующем виде:

$$\begin{aligned} \frac{1}{c} \frac{\partial I}{\partial t} + \eta \frac{\partial I}{\partial r} + \frac{1 - \eta^2}{r} \frac{\partial I}{\partial \eta} + (\varkappa_u + \varkappa_c) I = \\ = \varkappa_n I_n + \frac{3\varkappa_c}{16\pi} U \left( 1 + \frac{1 - \eta^2}{2} + \frac{2\eta^2 - 1}{2} D \right), \end{aligned} \quad (2.2)$$

$$r \in [0; R], \quad \eta \in [-1; 1], \quad I(R, \eta) = 0 \text{ при } \eta \leq 0,$$

$$D = \frac{\int_{-1}^1 I \eta^2 d\eta}{\int_{-1}^1 I d\eta}, \quad C_R = \frac{\int_0^1 \eta I(R, \eta) d\eta}{\int_0^1 I(R, \eta) d\eta}, \quad (2.3)$$

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{U}{\rho c} \right) + \frac{\partial W}{\partial m} + \frac{DU}{c} \frac{d}{dt} \left( \frac{1}{\rho} \right) - \frac{u}{c} \left( \frac{3D - 1}{r} \right) \frac{U}{\rho} = -Q_{re}, \quad (2.4)$$

$$\frac{1}{c} \frac{d}{dt} \left( \frac{W}{r^2} \right) + \frac{\partial(DU)}{\partial r} + \frac{3D - 1}{r} U + \frac{\varkappa}{r^2} W = 0, \quad (2.5)$$

$$W(0) = 0, \quad W(R) = R^2 C_R U(R),$$

$$Q_{re} = \frac{1}{\rho} \left( \varkappa_u U - \varkappa_n 4\sigma T^4 \right) + \Lambda \frac{\varkappa_c}{\rho} (\theta - T) U,$$

$$\frac{d\epsilon}{dt} + p \frac{d}{dt} \left( \frac{1}{\rho} \right) = \tilde{Q}_{re} + f(r, t), \quad (2.6)$$

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{1}{\rho} \right) = \frac{\partial(r^2 u)}{\partial m}, \quad \tilde{Q}_{re} = \int Q_{re} d\nu, \quad (2.7)$$

$$\frac{du}{dt} = -r^2 \frac{\partial p}{\partial m} + \frac{1}{c} \frac{\varkappa W}{\rho r^2}, \quad (2.8)$$

$$\frac{dr}{dt} = u, \quad \kappa_{\Pi} = \langle \kappa'_{\nu} \rangle_{\text{планк.}}, \quad \kappa'_{\nu} = \kappa'_{\nu}(T), \quad (2.9)$$

$$\epsilon = \epsilon(T, \rho), \quad p = p(T, \rho),$$

где  $I(t, \nu, r, \eta)$  — спектральная интенсивность излучения,  $r$  — эйлерова координата (источник в центре симметрии — начале системы координат),  $\eta$  — косинус угла между радиус-вектором точки наблюдения и направлением полета кванта излучения,  $R$  — радиус расчетной области,  $\kappa_u, \kappa, \kappa_{\Pi}$  — осредненные различным образом по частоте коэффициенты поглощения излучения,  $\kappa'_{\nu}$  — коэффициент поглощения с учетом вынужденного излучения,  $\kappa_c$  — коэффициент томсоновского рассеяния,  $4\pi W(r) = 4\pi r^2 [\int_{-1}^1 \eta I d\eta - \frac{u}{c}(1+D)U]$  — поток энергии излучения через поверхность сферы радиуса  $r$  в системе координат движущегося вещества,  $\sigma$  — постоянная Стефана–Больцмана,  $D(r), C_R$  — коэффициенты квазидиффузии и граничного условия,  $m = \int_0^r \rho r^2 dr$  — лагранжева массовая координата,  $I_{\Pi}$  — групповая планковская функция,  $\theta = \theta(U)$  — яркостная температура излучения,  $\Lambda = 4k/m_e c^2$  — размерная константа в обменном члене,  $k$  — постоянная Больцмана,  $m_e$  — масса электрона.

Алгоритм решения системы (2.2)–(2.9) основан на принципах расщепления по физическим процессам и линеаризации. Решение системы линеаризованных разностных уравнений проведено методом отдельных прогонок с организацией совокупности итерационных процессов по нелинейности. Спектр излучения рассчитывается в многогрупповом приближении. В каждой группе при заданных значениях плотности и температуры решается уравнение переноса (2.2) и определяются групповые коэффициенты квазидиффузии  $D^p$  и граничного условия  $C^p$ . Затем для каждого спектрального интервала (группы) решаются уравнения квазидиффузии (2.4), (2.5) и определяются групповые значения плотности  $U^p$  и потока  $W^p$  энергии излучения. Уравнения (2.2), (2.4), (2.5) объединены в одном итерационном процессе, после окончания которого полученные групповые функции плотности и потока излучения приближенно описывают спектр излучения, эти функции в последующем используются для усреднения уравнений квазидиффузии по всему спектру.

После завершения многогруппового расчета проводится решение системы уравнений (2.4)–(2.9). Вначале совместно решаются уравнения (2.4), (2.5) с осредненными коэффициентами и уравнение энергии (2.6) и определяются функции температуры  $T(r)$  и интегральных по спектру плотности  $U(r)$  и потока  $W(r)$  энергии излучения. Затем решаются уравнения газовой динамики (2.7)–(2.9) с итерациями между системами (2.2)–(2.6) и (2.7)–(2.9) до сходимости.

Для решения уравнения переноса использована монотонная характеристическая схема с интерполяцией первого порядка точности [16]. При вычислении проводится линеаризация функций, для которых характерна

сильная нелинейность в зависимости от температуры:  $\kappa_u$ ,  $\kappa_p$ ,  $U_p$ . Достаточно хорошая сходимость ньютоновского процесса достигается при одновременном уточнении на итерации всех неизвестных величин ( $U, W, T$ ). Для решения системы уравнений газовой динамики применен метод интегрирования плотности [16] совместно с процедурой линеаризации.

Методика на основе высокотемпературной радиационной газовой динамики является на сегодняшний день наиболее последовательной в учете радиационно-газодинамических процессов и хорошо зарекомендовала себя в расчетах сильных взрывов в воздухе и конденсированных средах. Эта же методика использована для обоснования области применимости более грубых, в смысле учета процессов переноса излучения, двумерных численных методик.

### 2.1.3. Двумерная методика расчета радиационно-газодинамических процессов

В настоящее время основным подходом к исследованию радиационно-газодинамических процессов на начальной стадии мощного взрыва является проведение численных расчетов в рамках двумерной осесимметричной явной частично-трехслойной произвольной эйлерово-лагранжевой методики, основные положения которой приведены ниже. Методика представляет собой двумерный осесимметричный численный алгоритм расчета радиационно-газодинамических процессов с учетом переноса энергии излучением в одноклассовом параболическом диффузионном приближении. Методика применима для расчета радиационно-газодинамических процессов в воздухе — во всем диапазоне давлений и температур, характерных для мощного взрыва; в грунте и конструкционных материалах — при высоких давлениях ( $p > 40$  ГПа), когда сдвиговыми напряжениями можно пренебречь. В методике принята следующая система координат:  $z$  — ось симметрии или вертикальная координата с положительным направлением вверх и началом в эпицентре взрыва,  $r$  — радиальное направление.

**Исходная система уравнений.** На основе рассмотренной в предыдущем пункте модели высокотемпературной радиационной газовой динамики могут быть сформулированы максимальные требования, предъявляемые к двумерной математической постановке задачи. К ним относится учет следующих основных процессов: нестационарности, угловой анизотропии и спектральной неоднородности для переноса излучения, слабoreлятивистских эффектов движения в источнике и его ближайшей окрестности, процессов взаимодействия излучения и вещества с обменом между ними как энергией, так и импульсом, а также газодинамических движений вещества. Включение в расчет всех этих процессов при разумных предположениях о геометрических характеристиках реально решаемых задач приводит к необходимости использования чрезмерно больших вычислительных ресурсов, что часто недостижимо на практике либо экономически не оправдано.

Особенностью двумерных вычислительных методик по сравнению с одномерными является значительное увеличение размеров расчетного поля (пропорционально  $N^2$ , где  $N$  — пространственный размер сетки одномерной задачи). Поэтому при решении практических задач с использованием двумерных численных методик приходится вводить ограничения в математическую модель. В рассмотренной выше одномерной методике основные вычислительные затраты приходятся на решение уравнения переноса излучения и определение коэффициентов квазидиффузии. Вторым по затратам ресурсом компонентом одномерной методики является учет спектрального распределения излучения, т.е. решение уравнений переноса излучения в нескольких спектральных интервалах. В двумерной методике для описания процессов переноса излучения использовано одnogрупповое приближение. При этом поскольку, согласно [17], анизотропия излучения сказывается только вблизи фронта излучения, далее при построении методики в настоящей работе использовано параболическое диффузионное приближение. С учетом этих приближений система уравнений радиационной газовой динамики приобретает вид

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho \mathbf{u}) = 0, \quad (2.10)$$

$$\frac{\partial(\rho \mathbf{u})}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho \mathbf{u} \otimes \mathbf{u}) = -\operatorname{grad} p + 2 \operatorname{div}(\mu \mathbf{D}), \quad (2.11)$$

$$\frac{\partial(\rho \epsilon + U)}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho \epsilon \mathbf{u} + c \mathbf{W}) = -p \operatorname{div} \mathbf{u} + 2\mu \mathbf{D}^2 + \rho f(\mathbf{r}, t), \quad (2.12)$$

$$\frac{1}{c} \frac{\partial U}{\partial t} + \operatorname{div} \mathbf{W} = \varkappa(U_p - U), \quad \mathbf{W} = -\frac{1}{3\varkappa} \operatorname{grad} U, \quad (2.13)$$

где  $\mathbf{u} = \{u_r, u_z\}$  — вектор скорости движения вещества,  $U_p = 4\sigma T^4/c$  — плотность энергии равновесного излучения.

Особо следует остановиться на членах уравнений (2.11) и (2.12), содержащих коэффициент вязкости  $\mu$ . Высокоскоростное движение среды, возникающее вблизи источника с большим энерговыделением, вызывает интенсивную турбулизацию потока вещества, что требует введения физических механизмов вязкой диссипации энергии. Система уравнений (2.10)–(2.13) допускает произвольный выбор сдвиговой вязкости, как правило осуществляемый из соображений подавления нефизичных осцилляций в решении (различные модели искусственной вязкости, см., например, в работе [18]). В рамках настоящей методики выбор сдвиговой вязкости осуществлен на основе следующих соображений. Согласно данным работ [19–21], диссипация энергии турбулентного движения определяется характерным размером крупномасштабных турбулентных пульсаций, а также амплитудой пульсаций скорости движения вещества. Поскольку крупномасштабные пульсации обладают максимальными амплитудами среди всех пульсаций, то можно считать, что  $\Delta u \approx u$ , где  $\Delta u$  — амплитуда пульсаций скорости. За характерный пространственный