

ББК
24.5
П 580



А. М. ПОПОВ

КУМУЛЯТИВНЫЕ ЗАРЯДЫ



«Инфра-Инженерия»

А. М. ПОПОВ

КУМУЛЯТИВНЫЕ ЗАРЯДЫ

Монография

Москва Вологда
«Инфра-Инженерия»
2025

УДК 531:532:539.1

ББК 24.54

П58

Рецензенты:

доктор технических наук, профессор

C. M. Мужичек (Гос НИИАС);

доктор физико-математических наук, профессор

C. П. Струнков (НИИ системных исследований РАН)

Попов, А. М.

П58 Кумулятивные заряды : монография / А. М. Попов. – Москва ; Вологда : Инфра-Инженерия, 2025. – 416 с. : ил., табл.

ISBN 978-5-9729-2239-0

Изложены основные закономерности взрывных процессов и действия взрыва кумулятивного заряда в различных средах. Особое внимание удалено аналитическим расчетам параметров взрыва. Даны методы подобия и размерностей в механике к моделированию взрывов и связанные с ним процессы, рассмотрены критерии моделирования схемы горения.

Для научных работников и специалистов в области теории взрыва и горения.

554839

УДК 531:532:539.1

ББК 24.54

БИБЛИОТЕКА

ФГАОУ ВО

**Сибирский федеральный
университет**

ISBN 978-5-9729-2239-0

© Попов А. М., 2025

© Издательство «Инфра-Инженерия», 2025

© Оформление. Издательство «Инфра-Инженерия», 2025

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	6
Раздел 1. Физическая картина формирования и движения	
кумулятивной струи	8
Глава 1. Кумулятивная струя.....	8
1.1. Предварительные наблюдения	8
1.2. Формирование кумулятивной струи	9
1.3. Активная часть кумулятивного заряда	12
1.4. Действие струи и песта на преграды	14
1.5. Факторы, влияющие на кумулятивное действие	18
1.6. Гидродинамическая теория кумуляции.....	20
1.7. Модель формирования струи на основе комплексного анализа.....	25
1.8. Критические условия струеобразования	28
1.9. Разрушение струи и температура разогрева ее элементов	35
1.10. Особенности колебательного процесса в кумулятивной струе	37
Раздел 2. Деформация облицовки малого прогиба выемки	
кумулятивного заряда.....	42
Глава 2. Феноменологическая модель деформации и движения	
облицовки кумулятивной выемки заряда	42
2.1. Виды деформации облицовки кумулятивной выемки заряда	42
2.2. Феноменологическая модель деформации и движения облицовки	
сферической формы	45
2.3. Особенности деформации желобообразной облицовки	48
2.4. Влияние геометрических размеров на деформацию облицовки.....	49
2.5. Экспериментальные исследования	55
Глава 3. Активная часть кумулятивного заряда	67
3.1. Управление полем взрыва.....	67
3.2. Активная часть аксиального кумулятивного заряда	74
3.3. Активная часть удлиненного заряда	78
3.4. Картина выворачивания облицовки.....	83
3.5. Выворачивание облицовки с натеканием	85
Глава 4. Начальные условия метания	89
4.1. Начальная скорость разлета метаемых элементов	89
4.2. Экспериментальные исследования	94
4.3. Угол разлета	100
4.4. Баллистика метаемых элементов	105
4.5. Особенности баллистики желобообразной облицовки	
с разной формой поперечника	110
Раздел 3. Элементарная теория взрыва кумулятивного заряда	122
Глава 5. Элементарная теория ударных волн	122
5.1. Предварительные рассуждения	122
5.2. Основные зависимости теории ударных волн	124
5.3. Ударная адиабата	126
5.4. Энтропия газа при ударном сжатии	130
5.5. Диссипация энергии ударной волны	132
5.6. Косые ударные волны	137

Глава 6. Теория детонации кумулятивного заряда.....	142
6.1. Гидродинамическая теория детонации.....	142
6.2. Основные соотношения гидродинамической теории детонации кумулятивного заряда.....	146
6.3. Неустойчивые режимы детонации	151
6.4. Основные соотношения между параметрами на фронте детонационной волны.....	156
6.5. Уравнения состояния и изоэнтропы продуктов детонации.....	159
6.6. Термическое уравнение состояния продуктов детонации.....	163
6.7. Скорость детонации взрывчатых веществ	165
6.8. Определение параметров продуктов детонации за фронтом детонационной волны.....	171
Глава 7. Отражение продуктов детонации от различных сред	177
7.1. Разлет продуктов детонации с поверхности кумулятивного заряда.....	177
7.2. Условия на границе двух сред.....	182
7.3. Отражение падающей детонационной волны от различных сред.....	183
7.3.1. Отражение детонационной волны от металлической облицовки.....	183
7.3.2. Отражение от детонационной волны от поверхности жидкости.....	186
7.3.3. Отражение детонационной волны от поверхности газа.....	188
7.4. Отражение скользящей детонационной волны от облицовки	190
7.5. Отражение ударной волны от границы двух соударяемых инертных сред	191
7.5.1. Комбинация мягкой и твердой сред	191
7.5.2. Комбинация твердой и мягкой сред	194
Глава 8. Ударные волны в кумулятивных зарядах	196
8.1. Основные зависимости газодинамики для облицовок кумулятивных зарядов.....	196
8.2. Ударные адиабаты твердых и жидких сред	197
8.3. Уравнения состояния жидких и твердых сред.....	201
8.4. Ударные волны в пористых средах	207
Раздел 4. Моделирование деформации облицовки кумулятивного заряда.....	215
Глава 9. Лагранжево и эйлерово представления движения среды	215
9.1. Система отсчет наблюдателя и связанная система отсчета	215
9.2. Сущность точек зрения Лагранжа и Эйлера	217
Глава 10. Основные законы термодинамики и газовой динамики	221
10.1. Понятие о полной, локальной и конвективной производных	221
10.2. Уравнение Эйлера.....	224
10.3. Уравнение неразрывности	226
10.4. Дифференциальные уравнения движения газа	227
10.5. Уравнение Бернулли.....	230
10.6. Интеграл Лагранжа	233
Глава 11. Постановка задачи механики сплошной среды	237

11.1. Основные положения	237
11.1.1. Модель сплошной среды в заданной системе координат	238
11.1.2. Исходные уравнения	241
11.1.3. Начальные и граничные условия	243
11.2. Постановка задачи механики идеальной жидкости и газа	246
11.3. Постановка задачи механики упругопластической среды	249
11.4. Двумерное моделирование взрывных процессов аналитическими функциями	257
Глава 12. Основы моделирования быстропротекающих процессов.....	265
12.1. Общие сведения о численных методах математического моделирования	265
12.1.1. Устойчивость. Корректность. Сходимость.....	265
12.1.2. Понятие о приближении функций.....	266
12.1.3. Общие сведения о дифференциальных уравнениях	268
12.1.4. Аппроксимация производных	271
12.1.5. Частные производные	273
12.1.6. Элементы разностных схем	275
12.2. Сетки расчета взрыва заряда в воздухе	285
12.3. Общий подход к моделированию процесса деформации кумулятивной облицовки	291
12.4. Моделирование процесса горения	294
Глава 13. Применение теории подобия на практике	301
13.1. Теорема подобия	301
13.2. Определение критериев подобия	305
13.3. Моделирование взрыва заряда	307
13.4. Моделирование воздушной ударной волны	311
13.4.1. Физическая картина взрыва заряда в воздухе	311
13.4.2. Основные параметры воздушной ударной волны	313
13.5. Моделирование взрыва заряда в воде	320
13.5.1. Физическая картина взрыва в воде	320
13.5.2. Основные параметры подводного взрыва	322
13.6. Параметры взрыва заряда в грунте	324
13.7. Моделирование сложных систем	333
Глава 14. Математическое моделирование процесса деформации облицовки кумулятивной выемки	336
14.1. Расчетная схема деформации	336
14.2. Топология функции $W(z)$, описывающей движение элементов облицовки	339
14.3. Трансверсализация расчетных сеток	348
14.4. Функция сопротивления материала облицовки	349
14.5. Результаты расчетов	351
Приложение 1. Краткий справочник по элементарной математике	370
Приложение 2.....	392
Приложение 3	403
Библиографический список	404

ПРЕДИСЛОВИЕ

Книга посвящена обобщению теоретического и экспериментального материала, полученного, в основном, в ходе исследований в Военно-воздушной инженерной академии им. Н. Е. Жуковского.

При разработке содержания монографии редактор сознательно опустил, безусловно, важный материал, касающийся непростых вопросов формирования и баллистики классических кумулятивных струй. Этот материал в настоящее время достаточно хорошо рассмотрен, и существует в многочисленных приложениях. Тем не менее, для выдерживания общей структуры содержания, редактор ограничился в главе 1 рассмотрением, в общем, хрестоматийного материала по струям, в составлении которого он участвовал сам для учебников [2, 6].

В главе 2 рассмотрена феноменологическая модель, в которой изложена деформация облицовки кумулятивного заряда малого прогиба. Для первого приближения приводятся зависимости, характеризующие деформацию облицовки малого прогиба от геометрических размеров и материала облицовки. Показаны методики и схемы мишленной обстановки проведения различных исследований.

Глава 3 посвящена очень важному вопросу – методам расчета активной части и характеру выворачивания облицовки. В главе 4 рассмотрены начальные условия метания разных типов облицовок малого прогиба. Баллистические расчеты, в основном, получены на основе экспериментальных исследований, проведенных на полигоне ВВИА им. Н. Е. Жуковского. Приводятся особенности баллистики желобообразной облицовки с разной формой поперечного сечения.

Главы 5–8 были подготовлены с использованием замечательных лекций профессоров Саркисяна Р. С., Миропольского Ф. П. [2], прочтенных ими в ВВИА им. Н. Е. Жуковского. Часть материалов приводятся из монографий и учебных пособий [1, 5, 5.5–5.7, 6.8–6.9].

В главах 9–12 изложены обобщения подходов к построению математических моделей высокоскоростных процессов взрыва, рассмотрение которых, безусловно, является полезным в настоящей книге [1, 4, 9.1, 10.2, 12.1, 12.2, 12.7, 12.8].

Поскольку в главе 13 даны методы подобия и размерностей в механике к моделированию взрывов и связанные с ними процессы, то в дополнение к этим процессам в этой же главе вкратце рассмотрены критерии моделирования схемы горения. На основе рассмотрения теорем подобия, используемых для моделирования кумулятивных зарядов, для примера приведены прикладные задачи взрыва заряда в различных средах.

Для решения различных прикладных задач необходимо иметь хотя бы в первом приближении простые расчетные зависимости, позволяющие оценить решаемую непростую задачу импульсной деформации различных конструкций. Теоретической разработке этой методики, на примере деформации облицовки с использованием теории функций комплексной переменной посвящена заключительная глава 14.

Книга завершается библиографическим списком, который оформлен отдельно для каждой главы. В конце списка приводится литература, написанная автором или в соавторстве в разные годы в рамках настоящей книги.

При подготовке монографии были использованы материалы известных публикаций по физике горения и взрыва, а также лекций, читаемых в МГТУ им. Баумана и ВВИА им. Н. Е. Жуковского. Эти материалы оформлены в виде библиографического списка.

Автор искренне признателен профессорам С. М. Мужичеку и С. П. Стрункову за ценные замечания по рукописи и благодарит Р. Н. Петренко, Л. Н. Марданову за большой труд по подготовке книги к изданию.