

ББК  
24.5  
П580



**А. М. ПОПОВ**

# **КУМУЛЯТИВНЫЕ ЗАРЯДЫ**



**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

*С. М. Мужичек* (Гос НИИАС);

доктор физико-математических наук, профессор

*С. 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 уделено 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.

554739

УДК 531:532:539.1  
ББК 24.54



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<br>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<br>кумулятивного заряда .....                     | 42  |
| Глава 2. Феноменологическая модель деформации и движения<br>облицовки кумулятивной выемки заряда ..... | 42  |
| 2.1. Виды деформации облицовки кумулятивной выемки заряда .....  | 42  |
| 2.2. Феноменологическая модель деформации и движения облицовки<br>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<br>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<br>детонации кумулятивного заряда..... | 146 |
| 6.3. Неустойчивые режимы детонации.....   | 151 |
| 6.4. Основные соотношения между параметрами на фронте<br>детонационной волны.....         | 156 |
| 6.5. Уравнения состояния и изэнтропии 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<br>детонационной волны.....    | 171 |
| Глава 7. Отражение продуктов детонации от различных сред .....                            | 177 |
| 7.1. Разлет продуктов детонации с поверхности кумулятивного<br>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<br>облицовки.....                   | 183 |
| 7.3.2. Отражение от детонационной волны от поверхности<br>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<br>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<br>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<br>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<br>аналитическими функциями .....                | 257 |
| Глава 12. Основы моделирования быстропротекающих процессов .....                                  | 265 |
| 12.1. Общие сведения о численных методах математического<br>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<br>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<br>облицовки кумулятивной выемки ..... | 336 |
| 14.1. Расчетная схема деформации .....  | 336 |
| 14.2. Топология функции $W(z)$ , описывающей движение<br>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 поддержания 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 мишенной 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.