

**И. Ф. Кобылкин, В. В. Селиванов**

**Возбуждение и распространение  
взрывных превращений  
в зарядах взрывчатых веществ**

**Взрыв и удар: физика, техника, технологии**

И.Ф. Кобылкин, В.В. Селиванов

**Возбуждение и распространение  
взрывных превращений  
в зарядах взрывчатых веществ**



Москва

ИЗДАТЕЛЬСТВО  
МГТУ им. Н. Э. Баумана

2 0 1 5

УДК 532.5, 539.5  
ББК 2454  
К55

Рецензенты:

первый вице-президент – главный ученый секретарь РАН,  
д-р техн. наук, профессор *А.А. Каллистов*;  
зав. кафедрой «Молекулярная физика» Московского государственного  
университета им. М.В. Ломоносова д-р физ.-мат. наук, профессор *Н.Н. Сысоев*

**Кобылкин, И. Ф.**

К55      Возбуждение и распространение взрывных превращений в зарядах  
взрывчатых веществ / И. Ф. Кобылкин, В. В. Селиванов. — Москва :  
Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2015. — 354, [6] с. : ил.

ISBN 978-5-7038-4007-8

Изложены результаты исследований процессов возбуждения и распространения взрывных превращений в зарядах взрывчатых веществ и пороховых зарядах, возникающих при интенсивных локальных воздействиях металлических кумулятивных струй и высокоскоростных ударников, в том числе и формируемых взрывом. Основное внимание уделяется установлению механизмов, закономерностей и критериев возбуждения и распространения в зарядах взрывчатых веществ, заключенных в оболочки, и пороховых зарядах, составленных из артиллерийских порохов, необходимых режимов взрывного превращения, позволяющих, с одной стороны, обеспечить их надежное возбуждение и распространение при штатном функционировании, а с другой – предотвращение или снижение их интенсивности при незапланированных видах воздействия.

Предложен и обоснован метод взрывного разминирования оболочечных взрывных устройств без возбуждения детонации в их снаряжении с помощью малогабаритных кумулятивных зарядов.

Для научных работников, инженеров, аспирантов и студентов, специализирующихся в области исследования физики горения и взрыва, теории взрывчатых веществ и прикладных вопросов безопасного применения взрывчатых веществ и порохов.

УДК 532.5, 539.5  
ББК 2454

ISBN 978-5-7038-4007-8

© Кобылкин И.Ф., Селиванов В.В., 2015  
© Оформление. Издательство  
МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2015

## Оглавление

---

Предисловие .....	7
<b>Глава 1. Физические основы анализа процесса распространения ударных волн в неоднородных реагирующих средах .....</b>	<b>12</b>
1.1. Термодинамическое описание реагирующей среды .....	12
1.1.1. Взаимосвязь между давлением и объемом в реагирующей среде .....	12
1.1.2. О возможности протекания твердофазной детонации в конденсированных взрывчатых веществах .....	14
1.2. Эволюция ударных волн в реагирующих средах. Влияние кривизны фронта ударной волны .....	17
1.3. Кинетика разложения взрывчатых веществ в ударных волнах .....	23
1.3.1. Теоретический подход к построению кинетических уравнений .....	24
1.3.2. Построение кинетических уравнений с использованием экспериментальных данных .....	28
1.4. Поведение зарядов взрывчатых веществ под действием слабых ударных волн .....	34
1.4.1. Критические условия возбуждения низкопорядковых взрывных процессов .....	35
1.4.2. Кинетика разложения зарядов взрывчатых веществ в слабых ударных волнах .....	42
1.5. Возбуждение низкопорядковых взрывных процессов при динамическом деформировании зарядов взрывчатых веществ .....	48
1.6. Критические условия возбуждения детонации .....	54
1.7. Поведение зарядов взрывчатых веществ при последовательном нагружении их несколькими ударными волнами .....	59
<b>Глава 2. Критические условия распространения стационарных детонационных волн в зарядах конденсированных взрывчатых веществ .....</b>	<b>74</b>
2.1. Теории критического диаметра детонации неоднородных зарядов взрывчатых веществ .....	74
2.1.1. Неидеальная детонация неоднородных зарядов взрывчатых веществ ...	74
2.1.2. Критический диаметр стационарной детонации неоднородных зарядов конденсированных взрывчатых веществ .....	76
2.2. Влияние оболочки на величину критического диаметра детонации .....	85
2.2.1. Влияние оболочки на величину критического диаметра заряда взрывчатого вещества. Скорость детонации больше скорости звука в материале оболочки .....	86
2.2.2. Влияние оболочки на величину критического диаметра заряда взрывчатого вещества. Скорость детонации меньше скорости звука в материале оболочки .....	90
2.3. Предел распространения детонации в тонких слоях взрывчатых веществ ...	93
2.4. Распространение детонационных волн в зарядах взрывчатых веществ с угловыми границами. Дифракция детонационных волн .....	98

2.5. Примеры практического применения теории критического диаметра . . . . .	102
2.5.1. Критический диаметр малочувствительных взрывчатых составов . . . . .	102
2.5.2. Критический диаметр детонации зарядов промышленных взрывчатых веществ . . . . .	109
2.6. Взаимосвязь критических диаметров зарядов взрывчатых веществ с характеристиками их ударно-волновой чувствительности . . . . .	116
2.7. Распространение детонации в зарядах взрывчатых веществ конечного диаметра . . . . .	120
2.7.1. Зависимость скорости детонации от диаметра заряда взрывчатого вещества . . . . .	120
2.7.2. Уравнение формы фронта неидеальной детонационной волны и структура течения в зоне химической реакции . . . . .	122
<b>Глава 3. Механизмы и критерии возбуждения взрывных процессов в зарядах взрывчатых веществ при воздействии кумулятивных струй</b>	<b>141</b>
3.1. Общая характеристика проблемы. Классификация схем воздействия кумулятивных струй на заряды взрывчатых веществ . . . . .	141
3.2. Схемы и методы экспериментального исследования и используемые кумулятивные заряды . . . . .	144
3.3. Феноменологическая классификация режимов ответной реакции зарядов взрывчатых веществ на воздействие кумулятивных струй . . . . .	148
3.4. Механизмы возбуждения детонации в открытых зарядах взрывчатых веществ . . . . .	156
3.4.1. Анализ особенностей нагружения зарядов взрывчатых веществ и возбуждения детонации в них при воздействии кумулятивных струй . . . . .	156
3.4.2. Критерии возбуждения детонации в открытых зарядах взрывчатых веществ на начальной ударно-волновой стадии . . . . .	160
3.4.3. Влияние формы головной части и угла воздействия кумулятивных струй на инициирование детонации в зарядах взрывчатых веществ . . . . .	163
3.5. Возбуждение детонации на стадии сверхзвукового установившегося проникания кумулятивной струи в заряд взрывчатого вещества. Способы реализации . . . . .	168
3.5.1. Особенности возбуждения детонации в заряде взрывчатого вещества при его экранировании плотной сжимаемой преградой . . . . .	168
3.5.2. Энергетический критерий возбуждения детонации на стадии сверхзвукового установившегося проникания кумулятивных струй в заряд взрывчатого вещества . . . . .	176
3.5.3. Экспериментальное определение критического уровня воздействия кумулятивных струй на заряды взрывчатых веществ . . . . .	179
3.5.4. Влияние плотности зарядов термостойких взрывчатых веществ на их чувствительность к воздействию кумулятивных струй . . . . .	182
3.5.5. Управление инициирующей способностью. Способы переноса точки инициирования . . . . .	185
3.6. Теоретический анализ процесса возбуждения детонации на стадии установившегося сверхзвукового проникания кумулятивных струй в заряд взрывчатого вещества . . . . .	188
3.6.1. Характеристики баллистических ударных волн, образующихся при сверхзвуковом проникании кумулятивных струй в заряд взрывчатого вещества . . . . .	188

3.6.2. Дифференциальное уравнение эволюции головной баллистической ударной волны .....	190
3.6.3. Результаты количественного анализа .....	193
3.6.4. Численное моделирование процесса проникания кумулятивной струи в заряд взрывчатого вещества, заключенный в оболочку .....	196
3.7. Возбуждение низкопорядковых взрывных процессов при проникании кумулятивных струй в заряды взрывчатых веществ .....	200
<b>Глава 4. Возбуждение взрывных процессов в пороховых зарядах при воздействии кумулятивных струй .....</b>	<b>208</b>
4.1. Общая характеристика процессов, сопровождающих воздействие на пороховые заряды кумулятивных струй и компактных ударников .....	208
4.2. Детонационные характеристики артиллерийских порохов .....	210
4.3. Ударно-волновая чувствительность артиллерийских порохов .....	213
4.4. Поведение пороховых зарядов при динамическом уплотнении .....	215
4.5. Возбуждение взрывных процессов в пороховых зарядах при воздействии кумулятивных струй .....	219
<b>Глава 5. Возбуждение взрывных процессов в зарядах взрывчатых веществ, заключенных в оболочки, при воздействии высокоскоростных компактных ударников .....</b>	<b>227</b>
5.1. Общая характеристика ответных реакций зарядов взрывчатых веществ, заключенных в оболочки, на воздействие высокоскоростных компактных ударников .....	227
5.2. Построение энергетического критерия возбуждения детонации в экранированных зарядах взрывчатых веществ при воздействии высокоскоростных ударников .....	228
5.3. Возбуждение взрывных процессов в оболочечных взрывных устройствах при воздействии высокоскоростных ударников .....	234
5.4. Экспериментальное исследование возбуждения взрывных процессов в зарядах взрывчатых веществ, заключенных в оболочку, при контролируемом проникающем ударе .....	240
<b>Глава 6. Возбуждение детонации в экранированных тонких слоях взрывчатых веществ при воздействии кумулятивных струй и компактных ударников .....</b>	<b>250</b>
6.1. Возбуждение детонации в экранированных тонких слоях взрывчатых веществ при воздействии кумулятивных струй .....	250
6.1.1. Особенности возбуждения детонации в тонких слоях взрывчатых веществ, экранированных легким сжимаемым материалом .....	251
6.1.2. Особенности возбуждения детонации в тонких слоях взрывчатых веществ, экранированных металлическими пластинами .....	253
6.1.3. Теоретический анализ процессов возбуждения детонации в элементах динамической защиты при воздействии кумулятивных струй .....	257
6.2. Возбуждение детонации в тонких слоях взрывчатых веществ, размещенных между металлическими пластинами, при воздействии высокоскоростных компактных ударников .....	265
6.3. Исследования инициирования детонации в экранированных тонких слоях взрывчатых веществ при воздействии формируемых взрывом ударников ...	275

<b>Глава 7. Взрывное разминирование взрывных устройств без возбуждения детонации в их снаряжении</b> .....	282
7.1. Общая характеристика проблемы разминирования. Классификация методов обезвреживания единичных взрывных устройств .....	282
7.2. Экспериментальное исследование возбуждения низкопорядковых взрывных превращений в зарядах взрывчатых веществ, заключенных в оболочки, при взрывном и ударном воздействиях .....	288
7.2.1. Возбуждение низкопорядковых взрывных процессов при контактном взрыве заряда взрывчатого вещества .....	288
7.2.2. Возбуждение низкопорядковых взрывных процессов при неконтактном взрыве заряда взрывчатого вещества .....	291
7.2.3. Возбуждение низкопорядковых взрывных процессов при высокоскоростном ударе .....	296
7.3. Возбуждение низкопорядковых взрывных процессов в зарядах взрывчатых веществ, заключенных в оболочки, при воздействии кумулятивных струй. . .	299
7.4. Лабораторные испытания взрывной технологии разминирования при воздействии кумулятивных струй на макеты мин, установленные в грунт .....	304
7.5. Экспериментальное исследование разрушения прочных стальных оболочек, наполненных взрывчатыми веществами, при их пробитии кумулятивными струями .....	309
7.6. Анализ процесса горения заряда взрывчатого вещества, заключенного в прочную деформируемую оболочку, после его пробития кумулятивной струей .....	315
<b>Глава 8. Разработка и испытание кумулятивного устройства разминирования</b> .....	329
8.1. Анализ компоновки кумулятивного заряда-ликвидатора, предназначенного для уничтожения взрывных устройств .....	329
8.2. Инженерная методика выбора компоновочных и конструктивных характеристик кумулятивных устройств для бездетонационного разминирования взрывных устройств .....	335
8.3. Полигонные испытания взрывной технологии разминирования с помощью кумулятивных зарядов .....	343
8.4. Полигонные испытания кумулятивного устройства бездетонационного разрушения мин .....	348