

**К.П. Станюкович, Ф.А. Баум, Б.И. Шехтер**

# **Физика взрыва**

**Москва  
«Книга по Требованию»**

УДК 53  
ББК 22.3  
К11

К11 **К.П. Станюкович**  
Физика взрыва / К.П. Станюкович, Ф.А. Баум, Б.И. Шехтер – М.: Книга по Требованию, 2023. – 800 с.

**ISBN 978-5-458-41688-7**

В книге в систематизированном виде изложен комплекс вопросов, посвященных закономерностям превращений взрывчатых веществ и действию взрыва в разных средах. В ней с достаточной полнотой рассмотрены общие свойства взрывчатых веществ и условия их превращения в зависимости от различных физико-химических факторов, процессы детонации и горения. Изложены вопросы бризантного и фугасного действия взрыва, подробно рассмотрена теория кумуляции. Большое внимание уделено прикладной газовой динамике неустановившихся течений. Книга рассчитана на специалистов, работающих в области теории и практики взрыва, может явиться полезным пособием для студентов и аспирантов, специализирующихся в этой области.

**ISBN 978-5-458-41688-7**

© Издание на русском языке, оформление  
«YOYO Media», 2023  
© Издание на русском языке, оцифровка,  
«Книга по Требованию», 2023

Эта книга является репринтом оригинала, который мы создали специально для Вас, используя запатентованные технологии производства репринтных книг и печати по требованию.

Сначала мы отсканировали каждую страницу оригинала этой редкой книги на профессиональном оборудовании. Затем с помощью специально разработанных программ мы произвели очистку изображения от пятен, клякс, перегибов и попытались отбелить и выровнять каждую страницу книги. К сожалению, некоторые страницы нельзя вернуть в изначальное состояние, и если их было трудно читать в оригинале, то даже при цифровой реставрации их невозможно улучшить.

Разумеется, автоматизированная программная обработка репринтных книг – не самое лучшее решение для восстановления текста в его первоизданном виде, однако, наша цель – вернуть читателю точную копию книги, которой может быть несколько веков.

Поэтому мы предупреждаем о возможных погрешностях восстановленного репринтного издания. В издании могут отсутствовать одна или несколько страниц текста, могут встретиться невыводимые пятна и кляксы, надписи на полях или подчеркивания в тексте, нечитаемые фрагменты текста или загибы страниц. Покупать или не покупать подобные издания – решать Вам, мы же делаем все возможное, чтобы редкие и ценные книги, еще недавно утраченные и несправедливо забытые, вновь стали доступными для всех читателей.



<b>Глава X. Горение взрывчатых веществ . . . . .</b>	<b>363</b>
§ 50. Основные особенности процессов горения ВВ . . . . .	363
§ 51. Теории теплового и цепного воспламенения газов . . . . .	366
§ 52. Горение газов . . . . .	383
§ 53. Горение конденсированных взрывчатых веществ . . . . .	395
§ 54. Горение порохов . . . . .	410
§ 55. Переход горения в детонацию . . . . .	417
<b>Глава XI. Бризантность взрывчатых веществ . . . . .</b>	<b>429</b>
§ 56. Способы теоретической оценки бризантности . . . . .	429
§ 57. Импульс при отражении детонационной волны от стенки . . . . .	433
§ 58. Методика и результаты экспериментальных определений импульсов . . . . .	438
§ 59. Методы экспериментального определения бризантности ВВ . . . . .	444
§ 60. Расчет импульсов, действующих на боковую поверхность оболочки заряда . . . . .	452
§ 61. Определение скорости осколков, разлетающихся с боковой поверхности заряда . . . . .	458
§ 62. Одномерное метание тел продуктами детонации . . . . .	464
<b>Глава XII. Кумуляция . . . . .</b>	<b>469</b>
§ 63. Общие сведения . . . . .	469
§ 64. Разлет продуктов взрыва с косою поверхности заряда . . . . .	471
§ 65. Активная часть кумулятивного заряда . . . . .	478
§ 66. Кумуляция при металлической облицовке выемки . . . . .	484
§ 67. Элементы теории сходящихся струй . . . . .	494
§ 68. Элементы теории кумуляции при наличии металлической облицовки . . . . .	499
§ 69. Влияние неравномерности обжатия облицовки на распределение скоростей в кумулятивной струе . . . . .	510
§ 70. Теория бронепробивного действия кумулятивной струи . . . . .	517
§ 71. Движение кумулятивной струи . . . . .	520
§ 72. Физические основы теории бронепробивного действия кумулятивной струи . . . . .	524
§ 73. Скорость бронепробивания и давление при встрече струи с преградой . . . . .	526
§ 74. Определение глубины бронепробивания . . . . .	531
§ 75. Определение диаметра пробоины . . . . .	534
§ 76. Влияние быстрого вращения на устойчивость кумулятивной струи и ее бронепробивное действие . . . . .	535
§ 77. Об устойчивости кумулятивной струи . . . . .	538
§ 78. Сверхскоростная кумуляция . . . . .	543
<b>Глава XIII. Взрыв в воздухе . . . . .</b>	<b>555</b>
§ 79. Основные физические явления, происходящие при взрыве . . . . .	555
§ 80. Одномерный разлет продуктов детонации . . . . .	565
§ 81. Разлет продуктов детонации с косою среза . . . . .	579

§ 82. Разлет продуктов детонации в воздух . . . . .	587
§ 83. Предельная «акустическая» стадия процесса . . . . .	591
§ 84. Теория точечного взрыва. Сильная автомодельная ударная волна. Сходящаяся сильная волна . . . . .	598
§ 85. Сферический взрыв . . . . .	624
§ 86. Влияние собственной скорости поступательного движения заряда на эффективность взрыва . . . . .	640
§ 87. Некоторые результаты экспериментального исследования разрушительного действия взрыва . . . . .	644
<b>Глава XIV. Взрыв в плотных средах . . . . .</b>	<b>664</b>
§ 88. О распространении ударных волн в плотных средах . . . . .	664
§ 89. Распространение сферической ударной волны в воде . . . . .	681
§ 90. Некоторые вопросы теории взрыва в жидкости . . . . .	690
§ 91. Задача Лагранжа для системы газ — жидкость — метаемое тело . . . . .	699
§ 92. Распространение волн в твердых телах . . . . .	708
§ 93. Элементы теории взрыва в грунте . . . . .	718
§ 94. Взрыв на выброс . . . . .	733
§ 95. Удар метеоритов о твердую поверхность . . . . .	745
<b>Глава XV. Передача детонации через влияние . . . . .</b>	<b>754</b>
§ 96. Передача детонации через воздух . . . . .	754
§ 97. Передача детонации через плотные среды . . . . .	771
§ 98. Передача детонации в шпурах . . . . .	778
<b>Дополнение. К теории кумуляции газов . . . . .</b>	<b>782</b>
<b>Литература . . . . .</b>	<b>793</b>
<b>Предметный указатель . . . . .</b>	<b>798</b>

---

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Взрывчатые вещества (ВВ), способные при взрыве совершать за весьма короткие промежутки времени значительную работу, по эффективности являются до сих пор одним из сильнейших источников энергии.

В военном деле ВВ применяются в различного рода огнестрельном оружии, в боеприпасах и подрывных средствах для метательных и разрушительных целей. В условиях современной войны ВВ играют исключительно большую роль и расходуются в колоссальных количествах. Кроме того, ВВ широко используются в народном хозяйстве при ведении строительных и горных работ: для прорытия каналов, пробивания шпуров и скважин, выброса грунтов и т. п. Взрывные способы ведения гидротехнических работ ныне с успехом применяются для решения задач, связанных с грандиозными планами строительства коммунизма. Поэтому рассмотрение вопросов физики взрыва и явлений ему сопутствующих представляют исключительный интерес.

В настоящей книге делается попытка восполнить существенный пробел в литературе по физике взрыва и процессам, происходящим при воздействии взрыва на окружающую среду.

Единственными подробными книгами по теории взрывчатых веществ (ВВ) до сих пор продолжают оставаться учебники К. К. Снитко «Теория взрывчатых веществ» (ч. I, 1934 г. и ч. II, 1936 г.), а также «Курс теории ВВ» Н. А. Соколова. Более чем за двадцатилетний срок со времени выхода в свет этих трудов учение о взрыве бурно развивалось благодаря работам ряда советских и иностранных ученых. Многие положения, излагаемые в курсах К. К. Снитко и Н. А. Соколова, к настоящему времени устарели. Ряд важных вопросов, экспериментальная и теоретическая разработка которых получила широкое развитие или завершение лишь за последние годы, естественно, в этих книгах либо не рассматривается вовсе, либо освещен совершенно недостаточно.

В настоящее время физика взрыва, широко используя методы газовой динамики, теоретической и экспериментальной физики, физической химии и т. п., оказалась способной анали-

тически описать ряд сложных явлений, которые ранее получали в лучшем случае лишь качественную трактовку. Это привело к тому, что она превратилась в достаточно стройную и строгую науку, охватывающую обширный круг весьма важных и сложных теоретических и прикладных вопросов. В связи с этим появилась необходимость в критическом обобщении многочисленных, порой разрозненных и противоречивых исследований по физике взрыва.

Содержание и расположение материала в данной книге в основном соответствует современному представлению о физике взрыва. Поскольку книга должна не только фиксировать современный уровень, достигнутый по ряду вопросов, но и дать перспективу их дальнейшего развития, авторы сочли необходимым хотя бы вкратце осветить в порядке постановки или предварительного исследования некоторые проблемы, которые, по их мнению, могут приобрести актуальное значение в современной науке и технике. Можно полагать, что в таком виде настоящий труд окажется полезным не только для научных работников, но и студентов-физиков и механиков, специализирующихся в этой интересной области науки.

Авторы, подробно рассматривая физические явления, происходящие при взрыве, совершенно не касаются вопросов атомного взрыва, считая, что его специфические особенности должны быть подробно описаны в специальной монографии. Однако некоторые закономерности распространения ударных волн в различных средах могут быть использованы и при анализе действия атомного взрыва. Большое внимание в книге уделяется прикладным вопросам газовой динамики неустановившихся течений, без которых невозможно изучение вопросов физики взрыва.

Предлагаемая вниманию читателей книга является первым опытом по созданию современной монографии по физике взрыва и, безусловно, не свободна от ряда недостатков, за указание которых авторы будут благодарны читателям.

Главы I, II, IV, V, VI, VII, VIII, X написаны Ф. А. Баумом; главы XIII и XIV написаны К. П. Станюковичем; главы III, IX и XV написаны Б. И. Шехтером. Главы XI и XII написаны совместно Баумом и Станюковичем, § 46 написан Шехтером, а § 86 написан Станюковичем и Баумом, § 98 и § 87 — Баумом и Шехтером и дополнение написано Станюковичем.

Авторы выражают свою признательность М. А. Садовскому, А. С. Компанейцу и Г. И. Покровскому за ценные указания, сделанные при просмотре рукописи.

---

## ГЛАВА I

### ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ

#### § 1. Явление взрыва

Взрыв, в широком смысле этого слова, представляет собой процесс весьма быстрого физического или химического превращения системы, сопровождающийся переходом ее потенциальной энергии в механическую работу. Работа, совершаемая при взрыве, обусловлена быстрым расширением газов или паров, независимо от того, существовали ли они до или образовались во время взрыва.

Самым существенным признаком взрыва является резкий скачок давления в среде, окружающей место взрыва. Это служит непосредственной причиной разрушительного действия взрыва.

Взрывы могут быть вызваны различными физическими или химическими явлениями.

Можно привести следующие примеры взрывов, обусловленных физическими причинами:

1. «Взрыв» парового котла или бомбы со сжатым газом. В первом случае явление вызвано быстрым переходом перегретой воды в парообразное состояние, во втором случае — повышенным давлением газа в бомбе. В обоих случаях взрыв возникает вследствие преодоления сопротивления стенок резервуара, а его разрушительный эффект зависит от давления, под которым пары или газы находились в резервуаре.

2. Взрывы, возникающие при мощных искровых разрядах, например молниях, или при пропускании электрического тока высокого напряжения через тонкие металлические нити.

При мощных разрядах разность потенциалов выравнивается за промежутки времени порядка  $10^{-6}$ — $10^{-7}$  сек, благодаря чему в зоне разряда достигается колоссальная плотность энергии и чрезвычайно высокие температуры (порядка десятков тысяч градусов), что в свою очередь приводит к сильному подъему давления воздуха в месте разряда и распространению интенсивного возмущения в окружающей среде.

Взрывы проволочек под действием электрической энергии обусловлены внезапным переходом металла в парообразное состояние; температура при этом достигает величины порядка 20 000°.

Взрывы, основанные на подобных физических явлениях, находят весьма ограниченное применение и являются главным образом предметом специальных научных исследований.

В дальнейшем мы будем рассматривать лишь взрывы, вызванные процессами химического превращения взрывчатых веществ (ВВ).

Взрывчатые вещества представляют собой относительно неустойчивые в термодинамическом смысле системы, способные под влиянием внешних воздействий к весьма быстрым экзотермическим превращениям, сопровождающимся образованием сильно нагретых газов или паров.

Газообразные продукты взрыва благодаря исключительно большой скорости химической реакции практически занимают в первый момент объем самого ВВ и, как правило, находятся в сильно сжатом состоянии, вследствие чего в месте взрыва резко повышается давление.

Из изложенного следует, что способность химических систем к взрывчатым превращениям определяется следующими тремя факторами: экзотермичностью процесса, большой скоростью его распространения и наличием газообразных (парообразных) продуктов реакции. Эти свойства могут быть у различных ВВ выражены в различной степени, однако только их совокупность придает явлению характер взрыва.

Рассмотрим значение каждого из этих факторов.

*Экзотермичность реакции.* Выделение тепла является первым необходимым условием, без которого возникновение взрывного процесса вообще невозможно. Если бы реакция не сопровождалась выделением теплоты, то самопроизвольное развитие ее, а следовательно, и самораспространение взрыва было бы исключено. Очевидно, что вещества, требующие для своего распада постоянного притока энергии извне, не могут обладать взрывчатыми свойствами.

За счет тепловой энергии реакции происходит разогрев газообразных продуктов до температуры в несколько тысяч градусов и последующее их расширение. Чем больше теплота реакции и скорость ее распространения, тем больше разрушительное действие взрыва.

Теплота реакции является критерием работоспособности ВВ и важнейшей их характеристикой.

Для современных ВВ, нашедших наиболее широкое применение в технике, теплота взрывчатого превращения колеблется в пределах от 900 до 1800 ккал/кг.

*Большая скорость процесса.* Наиболее характерным признаком взрыва, резко отличающим его от обычных химических реакций, является большая скорость процесса. Переход к конечным продуктам взрыва происходит за сотысячные или даже миллионные доли секунды. Большая скорость выделения энергии определяет преимущества взрывчатых веществ по сравнению с обычными горючими. В то же время по общему запасу энергии, отнесенной к равным весовым количествам, даже наиболее богатые энергией ВВ не превосходят обычные горючие системы, однако при взрыве достигается несравненно более высокая объемная концентрация или плотность энергии.

Это можно, например, видеть из данных, приведенных в табл. 1.

Таблица 1  
Теплоты взрыва и калорийность некоторых ВВ  
и горючих смесей

ВВ или горючее	Теплота взрыва или теплотворная способ- ность отнесения к 1 кг ВВ или горючей смеси, ккал
Пироксилин (13,3% N) . . . . .	1040
Нитроглицерин . . . . .	1485
Смесь бензола с кислородом	2330
Смесь углерода с кислородом	2130
Смесь водорода с кислородом	3230

Горение обычных горючих веществ протекает сравнительно медленно, что приводит к значительному расширению продуктов реакции в ходе процесса и существенному рассеиванию выделяемой энергии путем теплопроводности и излучения. По этим причинам в данном случае достигается лишь относительно низкая объемная плотность энергии в продуктах горения.

Взрывные процессы, наоборот, протекают столь быстро, что можно считать, что вся энергия практически успевает выделиться в объеме, занятом самим ВВ, что приводит к таким высоким концентрациям энергии, которые не достижимы в условиях обычного протекания химических реакций.

Особенно большие плотности энергии достигаются при взрыве конденсированных (твердых или жидких) ВВ, которые собственно только и находят применение в технике. Объясняется это тем, что эти ВВ обладают по сравнению с горючими газообразными смесями значительно меньшим удельным объемом (см. табл. 2).

Таблица 2

Объемная плотность энергии некоторых ВВ  
и горючих смесей

Название ВВ или горючей смеси	Объемная плотность энергии, отнесенная к 1 л ВВ или горючей смеси, ккал/л
Пироксилин (13,3% N) . . . . .	1350
Нитроглицерин . . . . .	2380
Смесь углерода с кислородом . . . . .	4,1
Смесь паров бензола с кислородом . . . . .	4,4
Смесь водорода с кислородом . . . . .	1,7

Цифры, приведенные для горючих (углерод, бензол), рассчитаны в предположении, что сгорание этих веществ полностью завершается в начальном объеме, занятом соответствующей смесью.

Из приведенных данных видно, что объемная плотность энергии, достигаемая при взрыве стандартных ВВ, превосходит объемную плотность для обычных горючих в сотни и тысячи раз. Этим и обусловлена большая мощность взрыва и способность к разрушительному действию.

Следует, однако, признать несостоятельным способ оценки мощности взрыва, принятый рядом авторов для наглядного показа значения скорости процесса в условиях взрыва. Для количественной оценки мощности взрыва при этом используется соотношение

$$B = \frac{MQI}{\tau} = \frac{MQID}{l}, \quad (1,1)$$

где  $B$  — мощность взрыва,  $M$  — вес заряда ВВ,  $\tau$  — время (в сек) распространения взрыва по заряду ВВ,  $Q$  — теплота взрыва в ккал/кг,  $I$  — механический эквивалент теплоты,  $D$  — линейная скорость распространения взрыва,  $l$  — длина заряда.

Согласно этой формуле при заданном конечном значении  $Q$  мощность взрыва  $B$  должна неограниченно возрастать по мере уменьшения времени  $\tau$ , а при  $\tau \rightarrow 0$   $B \rightarrow \infty$ .

Несостоятельность формулы (1,1) обусловлена тем, что в ней в качестве критерия мощности взрыва, т. е. работы, которую способны производить продукты взрыва в единицу времени, ошибочно принята величина, пропорциональная скорости  $D$  распространения взрыва по заряду, или скорости выделения энергии в процессе реакции взрывчатого разложения.

Заметим, что мощность, отнесенная к единице объема продуктов взрыва в условиях свободного их истечения в пустоту,

должна быть пропорциональна  $\rho q^3$ , где  $\rho$  — плотность продуктов взрыва и  $q$  — скорость их истечения в пустоту.

О быстроте протекания процессов взрывчатого превращения принято судить на основании данных о линейной скорости распространения взрыва по заряду ВВ. Максимальная скорость  $D$  распространения взрыва для современных ВВ, применяемых в технике, колеблется в пределах от 2000 до 9000 м/сек.

*Газообразование.* Высокие давления, возникающие при взрыве, и обусловленный ими разрушительный эффект не смогли бы быть достигнуты, если бы химическая реакция не сопровождалась образованием достаточно большого количества газообразных продуктов. Эти продукты, находящиеся в момент взрыва в чрезвычайно сжатом состоянии, являются теми физическими агентами, в процессе расширения которых осуществляется крайне быстро переход потенциальной энергии ВВ в механическую работу, или кинетическую энергию движущихся газов.

Объем газообразных продуктов взрыва (приведенный к нормальным физическим условиям) некоторых ВВ приведен в таблице 3.

Таблица 3

## Объем продуктов взрыва

Название ВВ	Объем газообразных продуктов взрыва в л	
	на 1 кг ВВ	на 1 л ВВ
Пироксилин (13,3% N) . . . . .	765	995
Пикриновая кислота . . . . .	715	1145
Тротил . . . . .	740	1180
Нитроглицерин . . . . .	690	1105

Таким образом, на 1 л обычных ВВ образуется около 1000 л газообразных продуктов, которые находятся в момент взрыва под очень большим давлением.

Максимальное давление при взрыве конденсированных ВВ достигает сотен тысяч атмосфер. Подобные давления, естественно, не могут быть реализованы в условиях протекания обычных химических реакций.

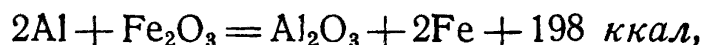
При взрыве газообразных систем увеличение объема обычно не происходит, а в некоторых случаях взрывчатое превращение даже сопровождается уменьшением объема.

Примером такой реакции может служить взрыв гремучего газа



в результате которого происходит сокращение объема на одну треть. Однако это уменьшение объема компенсируется экзотермичностью и скоростью процесса, благодаря чему давление при взрыве все же достигает величины порядка 10 атм.

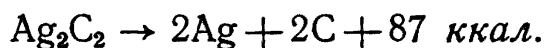
Значение фактора газообразования для взрывных процессов может быть установлено на ряде реакций, при которых не образуются газообразные продукты. Простейшей реакцией такого типа является хорошо известная термитная реакция



протекающая, как правило, без взрыва, несмотря на то, что тепловой эффект реакции является достаточным для нагревания конечных продуктов ( $\text{Fe}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) до  $3000^\circ$ , при которой они находятся в жидком состоянии. В условиях воспламенения больших количеств термитной смеси иногда наблюдаются явления, напоминающие по своему характеру обычный взрыв. Анализ подобных взрывов приводит к заключению, что они являются главным образом следствием вторичных явлений, связанных с разогревом и расширением окружающего воздуха, а также воздуха, заключенного в рыхлой массе термитной смеси. Кроме того, может также частично происходить весьма быстрое сгорание распыленного порошкообразного алюминия за счет кислорода воздуха. В этом случае один из продуктов реакции —  $\text{Al}_2\text{O}_3$  — будет частично находиться в парообразном состоянии.

В отличие от термитных и им подобных смесей мы также имеем ряд веществ, которые обладают всеми характерными свойствами ВВ, несмотря на то, что они при своем разложении образуют продукты, которые при нормальных условиях находятся в твердом состоянии.

Типичным примером подобных веществ является ацетиленид серебра, легко взрывающийся по следующей схеме:



Очевидно, что серебро должно вести себя в температурных условиях реакции как одноатомный газ.

Таким образом, на основании установленных нами качественных закономерностей можно заключить, что только одновременное сочетание трех основных факторов — экзотермичности, скорости процесса и газообразования — в состоянии обеспечить явлению те совокупные свойства, которые придают ему характер нормального взрыва.