

Министерство образования и науки Российской Федерации
Южно-Уральский государственный университет
Кафедра «Безопасность жизнедеятельности»

662(07)
3483

В.Г. Зеленкин, С.И. Боровик, М.Ю. Бабкин

ТЕОРИЯ ГОРЕНИЯ И ВЗРЫВА

Конспект лекций

Челябинск
Издательский центр ЮУрГУ
2011

УДК 662.1/.4(075.8) + 662.61(075.8)
3483

*Одобрено
учебно-методической комиссией
механико-технологического факультета*

*Рецензенты:
Ю.Г. Горшков, Н.И. Хохрякова*

Зеленкин, В.Г.

3483 Теория горения и взрыва: конспект лекций / В.Г. Зеленкин, С.И. Боровик, М.Ю. Бабкин. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2011. – 166 с.

Рассмотрены основы теории горения газов, жидкостей и твердых веществ и материалов с позиций пожаро- и взрывобезопасности. Приведены общие сведения о взрыве и взрывчатых веществах. Рассмотрены механизм взрывчатых превращений, возникновение и действие ударных волн и особенности взрыва в воздухе, грунте и воде.

Конспект лекций предназначен для студентов высших учебных заведений дневной и заочной форм обучения специальностей 280104 «Пожарная безопасность», 280101 «Безопасность жизнедеятельности в техносфере» и направления 280700 «Техносферная безопасность». Отдельные разделы могут быть использованы при выполнении курсовой работы по дисциплине «Теория горения и взрыва».

УДК 662.1/.4(075.8) + 662.61(075.8)

© Издательский центр ЮУрГУ, 2011

1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ГОРЕНИИ

1.1. Введение

Горение – одно из интереснейших и жизненно необходимых для людей явлений природы – привлекало к себе внимание передовых умов человечества с древнейших времен. Следы применения огня археологи находят при раскопках древнейших стоянок предков человека.

Первоначально предки человека сохраняли огонь, возникавший от самовозгорания или от молнии.

Далее – открытие способа добычи огня, основанное на трении кусков дерева друг о друга, позже – высекание искр из кремня и др.

В связи с развитием металлургии в XVII в. возникла необходимость в разработке теории горения.

Возникла ошибочная флогистонная теория:

металл + нагрев = флогистон + окалина металла;

окалина металла + флогистон + нагрев = металл.

Теория флогистона была опровергнута и окончательно отвергнута во второй половине XVIII века в результате введения в химию точных методов исследования.

М.В. Ломоносов впервые доказал, что сущность процесса горения заключается в химическом соединении горючего вещества с воздухом.

Французский ученый Лавуазье в 1773 году доказал, что окислителем является не весь воздух, а только входящий в его состав кислород. Так, во второй половине XVIII в. было научно доказано, что горение – это реакция окисления.

В конце XIX в. русский академик А.Н. Бах разработал теорию автоокисления и доказал, что горение является частным случаем общих процессов окисления (через образование пероксидных соединений, которые неустойчивы, склонны к разложению и распадаются с выделением наиболее активного атомарного кислорода).

Основа **теории теплового ускорения реакции горения**, сформулированная в 1884 г. Вант-Гоффом, была развита в 1928 г. академиком Н.Н. Семеновым, за что он в 1956 г. был удостоен Нобелевской премии. Н.Н. Семенов является также автором **теории цепных реакций горения**. Эти теории позволяют объяснить механизм перехода управляемого процесса горения в неуправляемый (переход обычного горения во взрывное), а также количественно оценить газовые взрывы. Школа, созданная академиком Н.Н. Семеновым, внесла существенный вклад в развитие современной теории горения.

1.2. Основные понятия

Горение – сложный физико-химический процесс, основой которого является быстро протекающая химическая реакция окисления, сопровождающаяся выделением значительного количества тепла и обычно ярким свечением (пламенем). Химическая реакция горения в большинстве случаев является сложной и состоит из большого числа элементарных химических процессов окислительно-восстановительного типа, приводящих к перераспределению валентных электронов между атомами взаимодействующих веществ. Кроме того, химическое превращение при горении тесно связано с рядом физических явлений – переносом тепла и масс и, соответственно, с гидро- и газодинамическими закономерностями. Согласно современной физико-химической теории горения, **процесс горения** – это реакции, связанные с быстрым превращением и тепловым или диффузионным ускорением [1, 2].

Различают три основных вида самоускорения химических реакций при горении: тепловое, цепное и цепочно-тепловое (комбинированное). Другими словами, горение – это экзотермическая реакция, протекающая в условиях ее прогрессивного самоускорения.

Для возникновения и протекания процесса горения необходимы следующие условия:

- наличие в определенный момент в данной точке пространства горючего вещества, окислителя и источника зажигания;
- горючее и окислитель должны находиться в определенном количественном отношении;
- источник зажигания должен обладать достаточной энергией.

Согласно ГОСТ 12.1.044-89 ССБТ все вещества и материалы по способности к горению (горючести) делятся на три группы [3]:

- горючие – способные самовозгораться, а также возгораться от источника зажигания и самостоятельно гореть после его удаления;
- трудногорючие – способные возгораться в воздухе от источников зажигания, но не способные гореть после его удаления;
- негорючие вещества – неспособные к горению в воздухе.

Окислителями в процессах горения могут быть: кислород (воздух), озон, перекиси, вещества богатые кислородом (нитросоединения, азотная кислота, перхлораты), галогены. Таким образом, класс веществ, выступающий в качестве окислителей, весьма обширный.

В качестве горючего, способного взаимодействовать с окислителем, также могут быть многие вещества: большинство металлов в свободном виде, сера элементарная и связанная (H_2S , FeS), окись углерода, водород и огромное число органических соединений.

Однако наибольшее практическое значение в качестве окислителя приобрел кислород (воздух), а в качестве горючего – углеводородные вещества (природный газ, нефть, угли, сланцы, торф и т. п.). Процессы сжигания этих горючих в атмосфере кислорода являются и наиболее изученными.

В зависимости от количественного соотношения горючего и окислителя различают три разновидности горючих смесей:

- стехиометрическая смесь, которая не содержит в избытке ни горючего компонента, ни окислителя;

- богатая смесь, содержащая в избытке горючее;

- бедная смесь, содержащая в избытке окислитель.

Наиболее вероятные источники зажигания в условиях производства:

- открытый огонь и раскаленные продукты горения;
- нагретые до высокой температуры поверхности технологического оборудования;

- тепловое проявление механической и электрической энергии;

- тепловое воздействие химических реакций, а также результаты жизнедеятельности микроорганизмов.

В некоторых случаях источником зажигания смеси могут служить лучи света (например, для смесей $\text{CO} + \text{Cl}_2$; $\text{H}_2 + \text{Cl}_2$), или вода для щелочных металлов.

По внешнему виду (признаку) горение может происходить и без пламени, то есть оно может быть пламенным или беспламенным (тлением).

В зависимости от агрегатного состояния исходных веществ (горючего и окислителя) различают три вида горения:

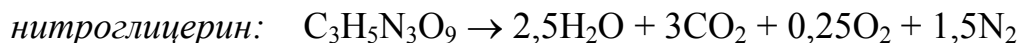
- гомогенное (однородное) горение газо- и парообразных горючих веществ в среде газообразного окислителя;

- гетерогенное (неоднородное) горение жидких и твердых горючих веществ и материалов в среде газообразного окислителя или горение жидких горючих в жидких окислителях;

- горение взрывчатых веществ (переход вещества из конденсированного состояния в газообразное):



(кислородный баланс меньше нуля);



(кислородный баланс больше нуля).

По скорости распространения пламени горение подразделяется на три группы:

- дефлаграционное (скорость – несколько м/с);

- взрывное (скорость – несколько десятков или сотен м/с);

- детонационное (скорость – до нескольких тысяч м/с).

Для **дефлаграционного горения** характерна передача тепла от слоя к слою, а пламя, возникающее в нагретой и разбавленной активными радикалами продуктами реакции смеси, перемещается в направлении исходной горючей смеси. Это объясняется тем, что пламя как бы становится источником, который выделяет непрерывный поток тепла и химически активных частиц. В результате этого фронт пламени и перемещается в сторону горючей смеси.

Дефлаграционное горение подразделяется на *ламинарное* и *турбулентное*. Скорость *ламинарного* горения зависит от состава смеси, начального давления и температуры, а также кинетики химических превращений. Скорость распространения турбулентного пламени помимо перечисленных факторов зависит от скорости потока, степени и масштабов турбулентности.

Взрывное горение может быть преднамеренным или случайным (аварийным). Преднамеренное взрывное горение характерно для пиротехнических составов (твердые ракетные топлива, пороха). Случайное взрывное горение следует за аварийным выбросом и образованием газо-, паро- или пылевоздушной смеси при наличии источника зажигания.

Детонационное горение свойственно для бризантных взрывчатых веществ, применяемых в различных отраслях промышленности (например, в горнодобывающей, строительстве) и в военном деле.

В теории горения рассматривается несколько основных типов пламен. Они неодинаковы по своему научному, практическому значению, степени изученности. Неодинаковы параметры, представляющие наибольший интерес для данного типа пламени. Наиболее важные для теории горения являются следующие типы пламен:

- 1) ламинарное пламя в гомогенной газовой смеси. К этому же типу относится пламя при горении летучих взрывчатых веществ;
- 2) ламинарное диффузионное пламя при горении струи горючего газа в окислительной атмосфере. К этому типу относится пламя при диффузионном горении жидкого горючего, налитого в цилиндрический сосуд, и т. п.;
- 3) пламя при горении капли жидкого горючего или частицы твердого горючего в окислительной атмосфере;
- 4) турбулентные пламена в гомогенных или в предварительно не смешанных газовых смесях;
- 5) пламя при горении нелетучих взрывчатых веществ, порохов и т. д. в тех случаях, когда существенную роль играет реакция в конденсированной фазе.

Имеется большое число промежуточных случаев, например, горение взвеси частиц твердого горючего или взвеси капель жидкого горючего в потоке газообразного окислителя (этот случай сочетает в себе признаки, характерные для пламен типа 3 и 1 или 3 и 4). Наибольший технический интерес представляют именно промежуточные случаи.

1.3. Горение и условия его протекания

Молекулярность реакции – это минимальное число молекул, участвующих в элементарном химическом процессе. По молекулярности элементарные химические реакции делятся на: молекулярные ($A \rightarrow$) и бимолекулярные ($A + B \rightarrow$); тримолекулярные реакции встречаются чрезвычайно редко.

Если реакция протекает последовательно через несколько гомогенных или гетерогенных элементарных стадий, то суммарная скорость всего процесса определяется самой медленной его частью, а молекулярность замещается порядком реакции – формальным показателем при концентрации реагирующих веществ. Поэтому весь процесс в целом лучше характеризует **порядок реакции**.

При избытке одного из компонентов элементарной реакции $A + B$ ($A \gg B$) скорость реакции будет практически зависеть от изменения концентрации вещества B ($A = \text{const}$), поэтому порядок бимолекулярной реакции понижается до первого. Аналогично тому, что скорость реакции может характеризоваться по любому веществу, участвующему в реакции, для реакции $aA + bB \rightarrow$ кинетические уравнения по веществу A и веществу B выглядят соответственно

$$V_A = kC_a^x \text{ и } V_B = kC_b^y,$$

а общее кинетическое уравнение

$$V_A = kC_a^x \cdot kC_b^y = kC^z.$$

Здесь $z = x + y$ – общий порядок реакции. Запишем кинетическое уравнение в дифференциальной форме для разных исходных реагентов:

$$-\frac{dC}{d\tau} = kC^2.$$

Разделение переменных и интегрирование в пределах от нуля до τ дает приведенные в табл. 1.1 уравнения для реакций первого, второго и третьего порядков.

Таблица 1.1

Кинетические уравнения и период полупревращения реакций первого, второго и третьего порядков

Порядок реакции Z	Кинетическое уравнение, размерность	Период полупревращения, τ_r
1	$k_1 = \frac{1}{\tau} \ln \frac{C_0}{C_\tau}, \text{ c}^{-1}$	$\tau_{1/2} = \frac{0,693}{k_1}, \text{ c}^{-1}$

Порядок реакции Z	Кинетическое уравнение, размерность	Период полупревращения, τ_t
2	$k_2 = \frac{1}{\tau} \left(\frac{1}{C_\tau} - \frac{1}{C_0} \right),$ л·моль·с ⁻¹	$\tau_{1/2} = \frac{1}{C_0 \cdot k_2},$ л·моль ⁻¹ ·с ⁻¹
3	$k_3 = \frac{1}{\tau} \left(\frac{1}{C_\tau^2} - \frac{1}{C_0^2} \right),$ л ² ·моль ⁻² ·с ⁻¹	$\tau_{1/2} = \frac{3}{C_0^2 \cdot k_3},$ л ² ·моль ⁻² ·с ⁻¹

Решения кинетических уравнений 2-го и 3-го порядка, приведенные в табл. 1.1, справедливы только при равных начальных концентрациях веществ. В каждом случае кинетическое уравнение линейно в соответствующих координатах $C(\tau)$, что позволяет графически определить порядок реакции (рис. 1.1).

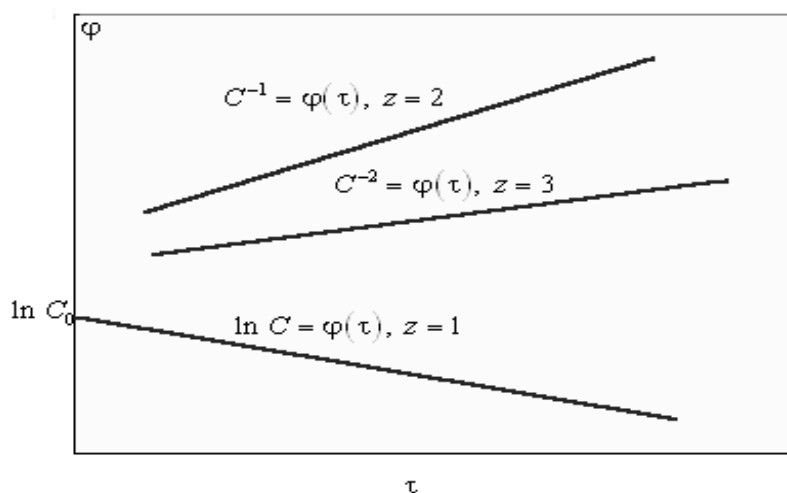


Рис. 1.1. Зависимости $C = f(\tau)$ для реакций первого, второго и третьего порядков

Прологарифмировав уравнение (1), получим $\lg V = \lg K + z \lg C$. Из графической зависимости (см. рис. 1.1) получаем $\lg K$ и $z = \operatorname{tg} \varphi$ (рис. 1.2).

Порядок реакции, особенно гетерогенной, может быть не только целочисленным (в том числе и нулевым), но и дробным. Нулевой порядок реакции указывает на постоянство скорости во времени.

Для гетерогенной реакции $C_{\text{тв}} + O_{2(\text{г})} = CO_{2(\text{г})}$ можно создать концентрационные условия, при которых порядок реакции будет меняться в пределах от нуля до единицы. Действительно, при больших парциальных давлениях кислорода P_{O_2} в приповерхностном слое твердого углерода большой концентрационный градиент способствует практически мгновенному вос-

полнению прореагировавшего кислорода. Следствием этого оказывается постоянство скорости реакции по кислороду, поскольку $C_{O_2} \sim \text{const}$. Поэтому реакция горения углерода будет в этих условиях подчиняться кинетическому уравнению нулевого порядка. При уменьшении парциального давления кислорода, начиная с некоторого P_{O_2} скорость реакции будет соответствовать кинетическому уравнению первого порядка

$$\frac{dc}{dt} = -KC_{O_2}.$$

При промежуточных давлениях кислорода порядок реакции изменяется в интервале от 0 до 1.

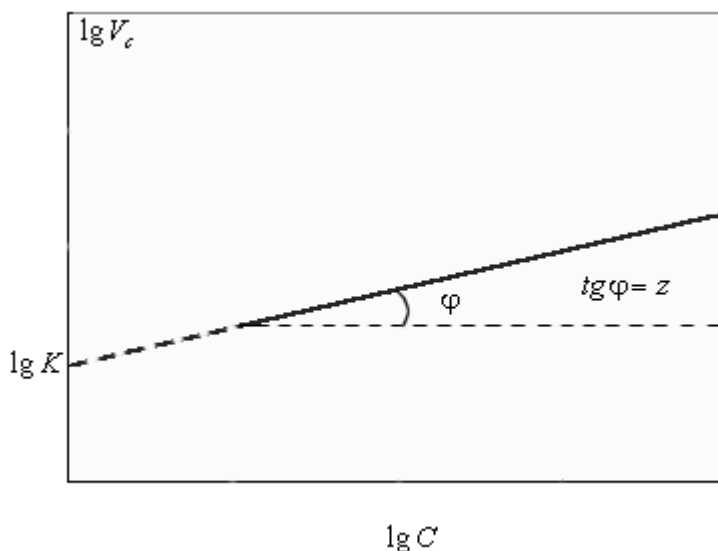


Рис. 1.2. Зависимость $V = f(\lg C)$

При анализе процесса горения первостепенное значение имеет изучение факторов, определяющих инициирование и скорость химических превращений [4, 5].

Для протекания процесса горения необходимым условием является наличие смеси реакционноспособных веществ, содержащей горючее и окислитель.

В химическую реакцию может вступать только «активная» частица горючей смеси, обладающая к моменту вступления в реакцию достаточным запасом энергии. Энергия, достаточная для необходимого сближения реагирующих частиц, называется **энергией активации** E_0 .

В реакцию могут вступать только активные молекулы (атомы, радикалы), то есть те, которые в момент соударения обладают энергией, превышающей энергию активации реакции. Доля активных молекул возрастает при увеличении температуры горючей смеси.

Зависимость скорости реакции от температуры описывается уравнением Аррениуса:

$$U = Ae^{-\frac{E_0}{RT}},$$

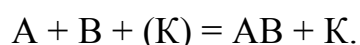
где A – коэффициент, учитывающий частоту соударений; e – основание натуральных логарифмов; E_0 – энергия активации; R – универсальная газовая постоянная; T – температура горючей смеси.

Однако на практике любая реакция горения может иметь одновременно признаки и теплового и цепного механизма протекания реакции. Зарождение первых активных центров может иметь тепловой характер, а реагирование активных частиц по цепному механизму приводит вновь к выделению тепла, разогреву горючей смеси и термическому зарождению новых центров.

Тепловое самовоспламенение. Тепловой эффект реакций частично идет на нагревание горючей смеси, частично теряется в окружающую среду. После предварительного нагрева горючей смеси и достижения такого состояния, когда приход тепла в результате реакции станет выше отвода тепла из зоны реакции, – начинается самоускорение реакции.

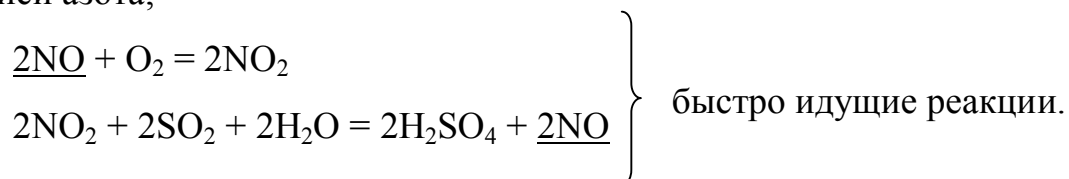
Чем больше давление (или концентрация газовой смеси), тем больше будет скорость реакции и, следовательно, будет больше теплоприход. А скорость теплоотвода не зависит от давления. Дальнейшее повышение давления приведет к повышению температуры и возникновению самовоспламенения.

Автокаталитически-тепловое самовоспламенение. Катализатор химической реакции – вещество, ускоряющее химическую реакцию, но не меняющее после реакции свое состояние:



Примером такого катализа реакции служит нитрозный способ получения серной кислоты:

$2SO_2 + O_2 + 2H_2O = 2H_2SO_4$ – идет очень медленно, но в присутствии окиси азота;



Явление, при котором каталитическое действие на реакцию оказывает какой-либо из продуктов, называется **автокатализом** (для начала обычно нужна «затравка»).

Вещества, которые замедляют протекание реакции, называют *отрицательными катализаторами* или *ингибиторами* реакции. Например, *хладоны* (предельные галогенуглеводороды), применяемые для тушения пожаров.

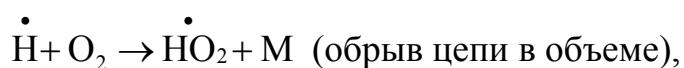
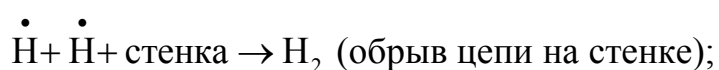
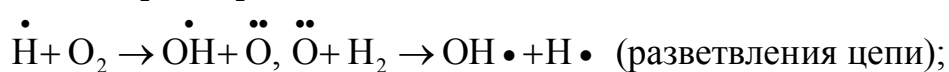
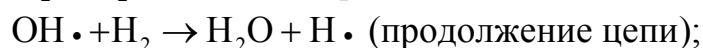
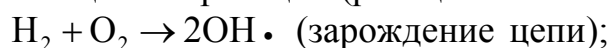
Цепное самовоспламенение имеет природу, отличную от теплового (выделение тепла происходит в результате разветвления реакционных цепей и накопления химически активных частиц, как правило, радикалов).

Любая цепная реакция складывается из элементарных стадий зарождения, продолжения и обрыва цепи. Зарождение цепей является экзотермической реакцией. Образование свободных радикалов возможно в результате моно- или бимолекулярных взаимодействий, а также в результате инициирования (добавке инициаторов, ионизация, действие света).

К реакциям продолжения цепи относятся элементарные стадии цепной реакции (существует четыре типа).

В любом цепном процессе должна быть, по крайней мере, одна стадия, в которой расходуется исходное вещество, и одна стадия, в которой образуются продукты реакции.

Обрыв цепи – исчезновение свободных радикалов. Пример разветвленной цепной реакции (реакция окисления H_2):



где M – молекула любого вещества, не участвующего в реакции.

Краткий сравнительный анализ трех механизмов самоускорения реакций горения позволяет кратко сформулировать:

- *тепловое самоускорение реакции* происходит вследствие саморазогрева горючей смеси за счет выделяющегося при реакции тепла;
- *автокаталитически-тепловое самоускорение* происходит в результате накопления продуктов реакции катализирующих превращение исходного вещества. Когда достигается перевес прихода тепла над его отводом, наступает тепловое самоускорение, заканчивающееся взрывом;
- *цепное самоускорение реакции* при постоянной температуре происходит в результате превышения разветвления над обрывом цепи, когда образуется достаточное количество активных центров, способствующих развитию цепного характера реакции.

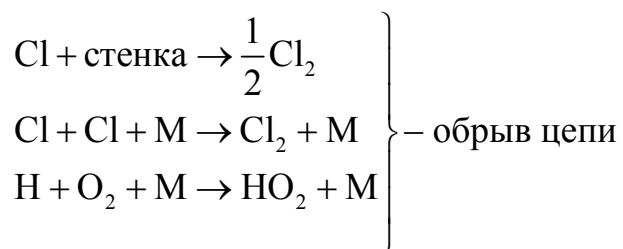
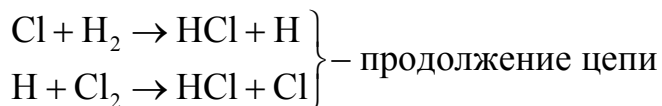
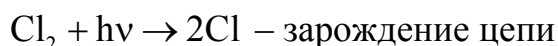
Но большинство процессов горения осуществляется по комбинированному механизму реакции.

Теория цепных реакций. Цепные реакции, химические и ядерные реакции, в которых появление промежуточной активной частицы (свободного радикала, атома или возбужденной молекулы – в химических, нейтрона – в ядерных процессах) вызывает большое число (цепь) превращений исходных молекул или ядер вследствие регенерации активной частицы в каждом элементарном акте реакции (в каждом звене цепи).

В изученных неразветвленных химических цепных реакциях активные центры – свободные атомы и радикалы, способные легко, с малой энергией активации реагировать с исходными молекулами, порождая наряду с молекулой продукта также новый активный центр. В разветвленных химических цепных реакциях в качестве активных центров могут выступать также возбужденные молекулы, а в вырожденно-разветвленных реакциях – также нестабильные молекулы промежуточных веществ.

Неразветвленные цепные реакции. Химические процессы с неразветвленными цепями можно рассмотреть на примере фотохимической реакции между водородом и хлором. В этой цепной реакции молекула хлора, поглощая квант света, распадается на два атома. Каждый из образовавшихся атомов хлора начинает цепь химических превращений; в этой цепи атомы хлора и водорода выступают в качестве активных частиц. Длина цепи может быть очень большой – число повторяющихся элементарных реакций продолжения цепи на один зародившийся активный центр может достигать десятков и сотен тысяч. Обрыв цепей происходит в результате рекомбинации атомов в объеме реактора, захвата атомов его стенкой с последующей рекомбинацией на стенке, образования неактивного радикала при реакции активных центров с молекулами всегда присутствующих примесей.

Реакцию между H_2 и Cl_2 , вызванную действием кванта света $h\nu$, можно представить схемой:



В последних двух стадиях М – любая третья частица (атом или молекула), которая нужна для того, чтобы отнять часть энергии у образующихся частиц Cl_2 и HO_2 и тем самым сделать невозможным их обратный распад.

Скорость цепных реакций чрезвычайно чувствительна к скоростям зарождения и обрыва и поэтому зависит от наличия химических примесей, от материала и состояния стенок реакционного сосуда, а также от его размера и формы.

По неразветвленно-цепному механизму протекает большое число практически важных реакций, в частности хлорирование, ряд реакций жидкофазного окисления органических соединений, термический крекинг. Своеобразным процессом с неразветвленными цепями является также полимеризация, при которой цепь реакций одновременно определяет и длину полимерной молекулы.

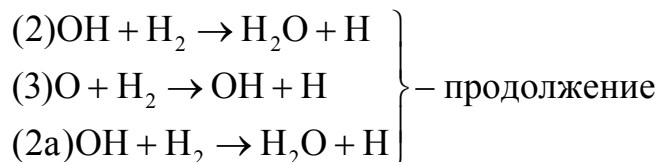
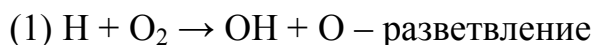
Концепция неразветвленных цепных реакций возникла в результате работ немецкого ученого М. Боденштейна обнаружившего, что в ряде фотохимических реакций один поглощенный квант света вызывает превращение многих молекул. В частности, при образовании HCl из H_2 и Cl_2 в среднем на каждый поглощенный квант образуется до 1 000 000 молекул HCl . Поскольку один квант может активировать только одну молекулу, остальные вступают в реакцию без непосредственного воздействия света. Механизм этой реакции предложил В. Нернст в 1916 г. Современная теория реакций с неразветвленными цепями была создана и развита школой Боденштейна, а также трудами советских ученых.

Реакции с разветвленными цепями. Совершенно особыми свойствами обладают реакции, в которых цепи разветвляются. Эти реакции были обнаружены в 1926 г. группой ленинградских физиков на примере окисления паров фосфора. Было установлено, что при малом изменении какого-либо параметра реакционной системы (концентрации реагентов, температуры, размера сосуда, примесей специфических веществ) и даже при разбавлении инертным газом практически незаметная реакция скачкообразно переходит в быстрый, самоускоряющийся процесс типа самовоспламенения.

Н.Н. Семеновым с сотрудниками впервые было дано объяснение этого парадоксального факта и создана количественная теория разветвленных цепных реакций. Значительный вклад в развитие представлений о разветвленных цепных реакциях внесли также работы С.Н. Хиншелвуда с сотрудниками по изучению верхнего предела воспламенения. За исследования механизма химических реакций Семенову и Хиншелвуду была присуждена в 1956 г. Нобелевская премия.

В ходе разветвленных цепных реакций при взаимодействии одного из активных центров возникает более чем один (часто – три) новый активный

центр, т. е. происходит размножение цепей. Примером разветвленной цепной реакции может служить окисление водорода, где разветвление и продолжение цепей происходит по схеме:



или в сумме $\text{H} + 3\text{H}_2 + \text{O}_2 = 2\text{H}_2\text{O} + 3\text{H}$.

Наряду с образующимися в реакциях 1–3 активными центрами H и OH, обеспечивающими развитие неразветвленной цепи, в реакции (1) образуется атом кислорода, формально обладающий двумя свободными валентностями и способный легко входить в реакцию (3) с образованием H и OH – еще двух носителей цепей. Такой тип разветвления был назван материальным.

В реакциях с энергетическим разветвлением размножение цепей осуществляется за счет возбужденных частиц – продуктов экзотермических реакций развития цепи.

Скорость разветвленно-цепного процесса в газовой фазе в начальных стадиях выражается формулой

$$W = k[A] \frac{\omega_0}{f - g} e^{(f-g)t}$$

где k – константа скорости реакции активного центра с исходным веществом, $[A]$ – концентрация исходного вещества, ω_0 – скорость зарождения цепей, f и g – соответственно эффективные константы скорости разветвления и обрыва, e – основание натурального логарифма, t – время.

В условиях, когда $(f - g) > 0$, концентрация активных центров и скорость W растут лавинообразно во времени. Если же $(f - g) < 0$, то концентрации активных центров и соответственно скорость реакции очень малы, так как мала скорость зарождения цепей ω_0 . Переход от одного режима реакции к другому осуществляется практически скачком при критическом условии $(f - g) = 0$.

Скорость разветвления цепей пропорциональна концентрации молекулярного реагента, вступающего в эту реакцию с активным центром. В то же время скорость гетерогенного обрыва цепей на стенке сосуда в зависимости от состояния его поверхности может не зависеть от концентрации или уменьшаться с ростом концентрации газовой смеси. Поэтому при повышении давления, начиная с определенного его значения (первый пре-

дел), f становится больше g и происходит самовоспламенение смеси. Если обрыв цепей протекает при тройных столкновениях, то его скорость пропорциональна произведению суммарной концентрации смеси и концентрации исходного реагента, образующего с активным центром малоактивный радикал. При дальнейшем повышении давления, начиная с определенного его значения (верхний предел), обрыв превалирует над разветвлением ($f < g$), и воспламенения не происходит. Давление, при котором $f = g$, называется критическим давлением.

По аналогичным причинам для разветвленных цепных реакций существует и критическая температура самовоспламенения. Поскольку скорость разветвления зависит от температуры сильнее, чем скорости обрыва, с повышением температуры область воспламенения расширяется.

Разветвленные цепные реакции – это не только химические и ядерные реакции. Явление когерентного излучения лазера, например, также относится к числу разветвленных цепных процессов.

Вырожденно-разветвленные цепные реакции. При развитии неразветвленных цепей часто образуется промежуточный молекулярный продукт типа перекисей, который сравнительно легко, но все же не слишком быстро распадается на свободные радикалы, начинающие дополнительные новые цепи. В этом случае имеет место сильно запаздывающее разветвление и идет медленная автоускоряющаяся реакция, названная вырожденно-разветвленной. Такие реакции сопровождаются продолжительным, иногда часовым периодом индукции (периодом скрытого автоускорения). К ним относится окисление углеводородов и многих других органических соединений.

Многим вырожденно-разветвленным реакциям в газовой и в жидкой фазах также свойственны предельные (критические) явления, но проявляются они не столь часто, как в обычных разветвленных цепных реакциях. Своеобразные реакции типа вырожденно-разветвленных протекают и в твердых телах, например при медленном термическом разложении кристаллов перхлората аммония. В кристаллах непосредственное разложение исходных веществ крайне затруднено и начинается на дефектах, прежде всего на дислокациях, вдоль которых образуются конечные вещества – газы или твердые продукты. При реакциях в дислокациях возникают механические напряжения, порождающие новые дислокации, т. е. идет их размножение, которое можно уподобить вырожденно-разветвленной цепной реакции.

Открытие разветвленных и вырожденно-разветвленных цепных реакций имело исключительно большое значение для создания теории процессов горения. Было доказано, что существуют только два типа воспламенения: цепное и тепловое. Теория цепных процессов лежит в основе управления процессами горения и играет большую роль в различных областях современной техники.

1.4. Понятие о кинетическом и диффузионном горении

Процесс горения зависит от множества условий, главнейшим из которых являются:

- состав горючей смеси;
- давление в зоне горения;
- температура реакции;
- геометрические размеры системы;
- агрегатное состояние горючего и окислителя и др.

В зависимости от агрегатного состояния горючего и окислителя различают следующие виды горения:

- гомогенное;
- гетерогенное;
- горение взрывчатых веществ (ВВ).

Гомогенное горение происходит в газо- или парообразных горючих системах – горючее и окислитель равномерно перемешаны друг с другом (рис. 1.3).

Так как парциальное давление кислорода в зоне горения равно или близко к нулю – кислород довольно свободно проникает к зоне горения, поэтому скорость горения определяется главным образом скоростью протекания химической реакции, увеличивающейся с ростом температуры. Такое горение (или горение таких систем) называется кинетическим.

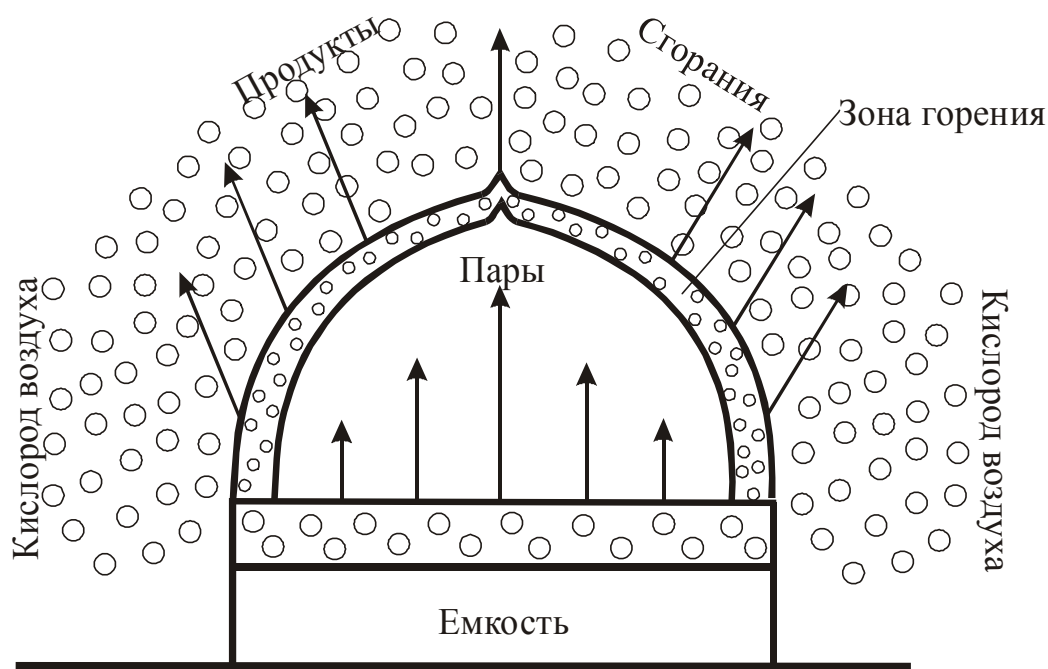


Рис. 1.3. Схема процесса горения паров или газов

Полное время сгорания в общем случае определяется по формуле

$$\tau_p = \tau_{\Phi} + \tau_{\chi},$$

где τ_{Φ} – время физической стадии процесса (диффузии O_2 к очагу через слой); τ_{χ} – время протекания химической стадии (реакции).

При горении однородных систем (смеси паров, газов с воздухом) время физической стадии процесса несоизмеримо меньше скорости протекания химической реакции, поэтому $\tau_p \approx \tau_{\chi}$ – скорость определяется кинетикой химической реакции и горение называется **кинетическим**.

При горении химически неоднородных систем время проникновения O_2 к горючему веществу сквозь продукты сгорания (диффузия) несоизмеримо больше времени протекания химической реакции, таким образом определяет общую скорость процесса, т. е. $\tau_p \approx \tau_{\Phi}$. Такое горение называется **диффузионным**.

Примерами диффузионного горения (рис. 1.4) является горение каменного угля, кокса (продукты горения препятствуют диффузии кислорода в зону горения).

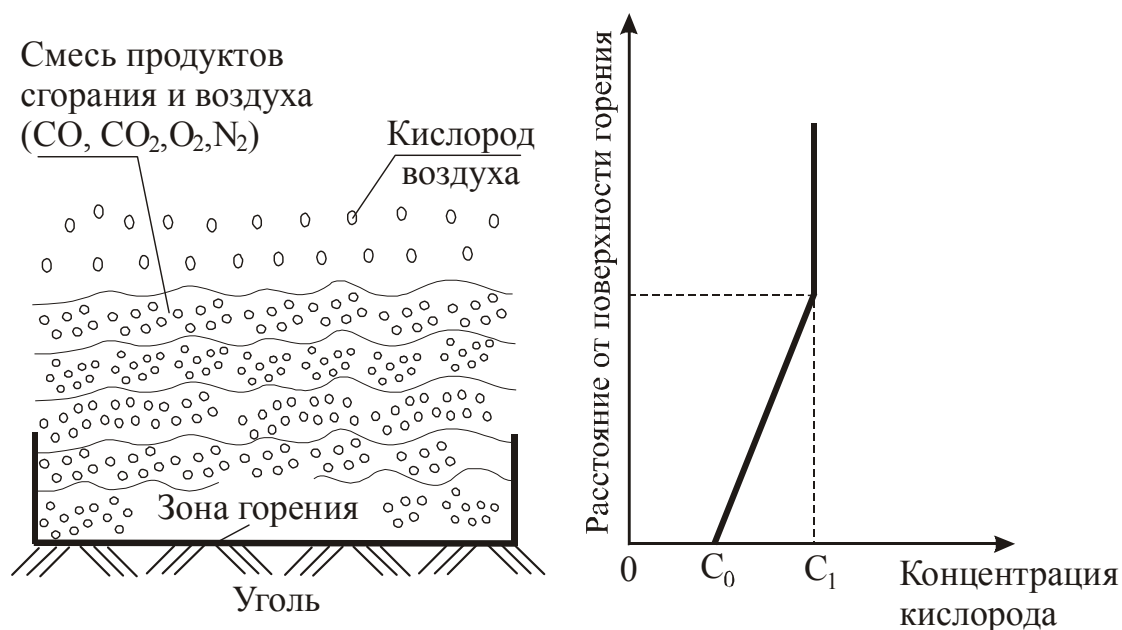


Рис.1.4. Схема диффузии кислорода в зону горения твердого вещества (гетерогенное горение)

Концентрация кислорода в объеме воздуха C_1 значительно больше его концентрации вблизи зоны горения C_0 . При отсутствии достаточного количества O_2 в зоне горения химическая реакция тормозится (и определяется скоростью диффузии).

Если продолжительность химической реакции и физической стадии процесса соизмеримы, то горение протекает в промежуточной области (на скорость горения влияют как физические, так и химические факторы).

При низких температурах скорость реакции слабо зависит от температуры (кривая медленно поднимается вверх). При высоких температурах скорость реакции сильно увеличивается (т. е. скорость реакции в кинетической области зависит главным образом от температуры реагирующих веществ).

Скорость реакции окисления (горения) в диффузионной области определяется скоростью диффузии и очень мало зависит от температуры. Точка А – переход из кинетической в диффузионную область (рис. 1.5).

Процесс горения всех веществ и материалов независимо от их агрегатного состояния происходит, как правило, в газовой фазе (жидкость – испаряется, твердые горючие вещества выделяют летучие продукты). Но горение твердых веществ имеет многостадийный характер. Под воздействием тепла – нагрев твердой фазы – разложение и выделение газообразных продуктов (деструкция, летучие вещества) – сгорание – тепло нагревает поверхность твердого вещества – поступление новой порции горючих газов (продуктов деструкции) – горение.

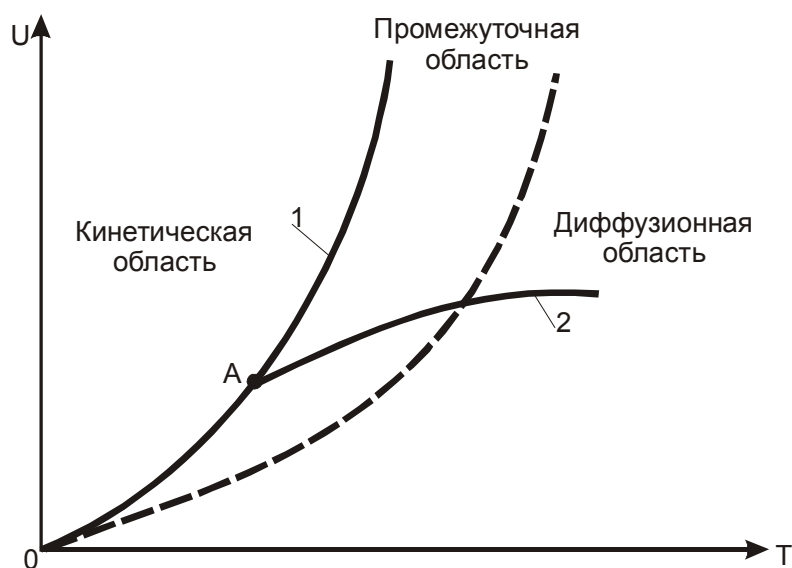


Рис. 1.5. Зависимость скорости U кинетического (1) и диффузионного (2) режимов от температуры. Точка А — переход из кинетической области в диффузионную

Многие твердые горючие вещества (древесина, хлопок, солома, полимеры) в своем составе имеют кислород. Поэтому для их сгорания требуется меньший объем кислорода воздуха. А горение взрывчатого вещества (ВВ) практически вообще не нуждается во внешнем окислителе.

Таким образом, горение ВВ — это самораспространение зоны экзотермической реакции его разложения или взаимодействие его компонентов путем передачи тепла от слоя к слою.

1.5. Химические реакции горения

Горение – сложный физико-химический процесс, основу которого составляют химические реакции окислительно-восстановительного типа, приводящие к перераспределению валентных электронов между атомами взаимодействующих молекул.

Примеры реакций горения

метана: $\text{CH}_4 + 2\text{O}_2 = \text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$;

ацетилен: $\text{C}_2\text{H}_2 + 2,5\text{O}_2 = 2\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$;

натрия: $2\text{Na} + \text{Cl}_2 = 2\text{NaCl}$;

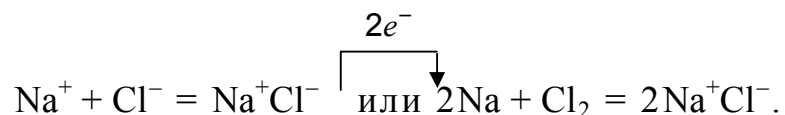
водорода: $\text{H}_2 + \text{Cl}_2 = 2\text{HCl}$, $2\text{H}_2 + \text{O}_2 = 2\text{H}_2\text{O}$;

тротила: $\text{C}_6\text{H}_2(\text{NO}_2)_3\text{CH}_3 = 2,5\text{H}_2\text{O} + 3,5\text{CO} + 3,5\text{C} + 1,5\text{N}_2$.

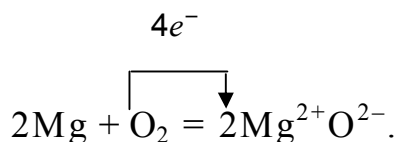
Сущность окисления – отдача окисляющимся веществом валентных электронов окислителю, который, принимая электроны, восстанавливается. Сущность восстановления – присоединение восстанавливаемым веществом электронов восстановителя, который, отдавая электроны, окисляется. В результате передачи электронов изменяется структура внешнего (валентного) электронного уровня атома. Каждый атом при этом переходит в наиболее устойчивое в данных условиях состояние.

В химических процессах электроны могут полностью переходить из электронной оболочки атомов одного вещества (элемента) в оболочку атомов другого.

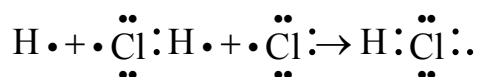
Так, при горении металлического натрия в хлоре атомы натрия отдают по одному электрону атомам хлора. При этом на внешнем электронном уровне атома натрия оказывается восемь электронов (устойчивая структура), а атом, лишившийся одного электрона, превращается в положительно заряженный ион. У атома хлора, получившего один электрон, внешний уровень заполняется восемью электронами, и атом превращается в отрицательно заряженный ион. В результате действия кулоновских электростатических сил происходит сближение разноименно заряженных ионов и образуется молекула хлорида натрия (ионная связь):



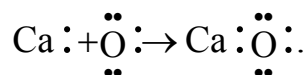
Атом магния имеет в наружном слое два электрона. При взаимодействии с кислородом два атома магния отдают четыре электрона молекуле (двум атомам) кислорода и превращаются в положительные двухзарядные ионы. Последние связываются с образовавшимися отрицательно заряженными ионами кислорода в кристаллы оксида магния MgO :



Таким образом, горение магния (окисление) сопровождается переходом его электронов к кислороду. В других процессах электроны внешних оболочек двух разных атомов поступают как бы в общее пользование, стягивая тем самым атомы молекул (*ковалентная* или *атомная* связь):



И, наконец, один атом может отдавать в общее пользование свою пару электронов (молекулярная связь):



Выводы из положений современной теории окисления–восстановления:

1. Сущность окисления заключается в потере электронов атомами или ионами окисляющегося вещества, а сущность восстановления – в присоединении электронов к атомам или ионами восстанавливающегося вещества. Процесс, при котором вещество теряет электроны, называется *окислением*, а присоединение электронов – *восстановление*.

2. Окисление какого-либо вещества не может произойти без одновременного восстановления другого вещества. Например, при горении магния в кислороде или воздухе происходит окисление магния и одновременно – восстановление кислорода. При полном сгорании образуются продукты, неспособные к дальнейшему горению (CO_2 , H_2O , HCl и т. д.), при неполном – получившиеся продукты способны к дальнейшему горению (CO , H_2S , HCN , NH_3 , альдегиды и т. д.). Схема: спирт – альдегид – кислота.

В условиях пожара при горении органических веществ в воздухе чаще всего полного сгорания не происходит. Признаком неполного сгорания является наличие дыма, содержащего несгоревшие частицы углерода.

1.6. Горение в атмосферном воздухе

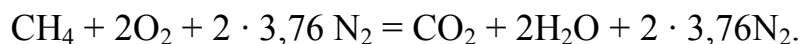
Воздух – это смесь газов, основными компонентами которой является азот (78% по объему), кислород (21%) и аргон (0,9%). Азот и аргон в процессе горения в химическом взаимодействии участия практически не принимают, так как являются инертными газами. Однако они влияют на этот процесс, снижая скорость реакции за счет расхода тепла на их нагрев.

Для многих расчетов (определение необходимого объема воздуха, объема продуктов сгорания, температуры горения и т. п.) необходимо составлять уравнение реакций горения веществ в воздухе. В этих уравнениях необходимо учитывать долю азота и аргона в воздухе.

Для простоты расчетов принимают, что воздух состоит из 21% кислорода и 79% азота, т. е. на один объем кислорода в воздухе приходится $79 : 21 = 3,76$ объема азота (или на каждую молекулу кислорода приходится 3,76 молекулы азота).

Продукты полного сгорания при горении компонентов горючих веществ (главным образом органических): углерода С – диоксид углерода CO_2 ; водорода Н – вода H_2O ; серы S – диоксид серы SO_2 и т. д. Азот, входящий в горючее вещество выделяется в свободном виде N_2 .

Пример составления уравнения реакции горения метана:



Учитывая, что расчет ведется обычно на 1 моль, 1 кг или 1 м^3 горючего вещества, в уравнении реакции коэффициент перед горючим, равен единице. Поэтому в некоторых уравнениях реакций горения перед кислородом или другим веществом могут быть дробные коэффициенты.

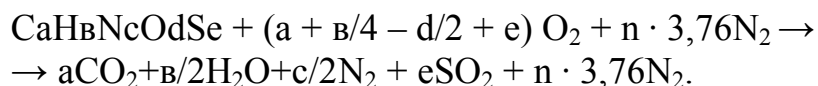
Порядок уравнивания числа молекул в реакции (левой и правой частях): углерод, водород, кислород и т. д.

Примеры реакций горения некоторых органических веществ:

- ацетилена: $\text{C}_2\text{H}_2 + 2,5\text{O}_2 + 2,5 \cdot 3,76 \text{N}_2 = 2\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} + 2,5 \cdot 3,76\text{N}_2$;
- пиридина: $\text{C}_5\text{H}_5\text{N} + 6,25\text{O}_2 + 6,25 \cdot 3,76\text{N}_2 = 5\text{CO}_2 + 2,5\text{H}_2\text{O} + 6,25 \cdot 3,76\text{N}_2 + 0,5\text{N}_2$;
- винилхлорида: $\text{C}_2\text{H}_3\text{Cl} + 2,5\text{O}_2 + 2,5 \cdot 3,76\text{N}_2 = 2\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} + 2,5 \cdot 3,76\text{N}_2 + \text{HCl}$;
- вторэтилена: $\text{C}_2\text{H}_3\text{F} + 2,5\text{O}_2 + 2,5 \cdot 3,76\text{N}_2 = 2\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} + \text{HF} + 2,5 \cdot 3,76\text{N}_2$.

Молекулы некоторых горючих веществ, так называемых технических продуктов, к которым относятся, например, бензин, керосин, дизельное топливо, масла и др. представлены условной химической формулой вида $\text{C}_a\text{H}_b\text{N}_c\text{O}_d\text{S}_e$, где а, в, с, d, е – число атомов соответственно углерода, водорода, азота, кислорода, серы.

Уравнение химической реакции в случае полного окисления таких веществ можно представить в следующем виде:



Примеры реакций горения технических продуктов:

- масло АМТ-300Т
 $\text{C}_{19,04}\text{H}_{24,58}\text{S}_{0,196}\text{N}_{0,04} + (19,04 + 24,58/4 + 0,196)\text{O}_2 + 25,381 \cdot 3,76\text{N}_2 = 19,04\text{CO}_2 + 24,58/2\text{H}_2\text{O} + 0,196\text{SO}_2 + 25,381 \cdot 3,76\text{N}_2 + 0,02\text{N}_2$;
- растворителя Р-4
 $\text{C}_{3,231}\text{H}_{7,788}\text{O}_{0,22} + (3,231 + 7,788/4 - 0,22/2)\text{O}_2 + 5,068 \cdot 3,76\text{N}_2 = 3,231\text{CO}_2 + 7,788/2\text{H}_2\text{O} + 5,068 \cdot 3,76\text{N}_2$.

1.7. Классификация и характеристика пожароопасных веществ

По способности к горению (горючести) вещества и материалы подразделяются на горючие, трудногорючие и негорючие (табл. 1.2). Горючие подразделяются на газы, жидкости и твердые вещества [3].

Горючие вещества и материалы по воспламеняемости подразделяются на три группы:

- 1) легковоспламеняющиеся;
- 2) вещества «средней воспламеняемости»;
- 3) трудновоспламеняющиеся.

Легковоспламеняющиеся – горючие вещества повышенной пожарной опасности, которые при хранении на открытом воздухе или в помещении способны без предварительного подогрева возгораться при кратковременном (до 30 с) воздействии источника зажигания с низкой энергией (от пламени спички, искры, сигареты и др.).

Таблица 1.2

Классификация веществ и материалов по горючести

Группа горючести	Определение согласно ГОСТ	Примеры веществ и материалов
1. Горючие	Способные самовозгораться, а также возгораться ¹ и самостоятельно гореть после удаления источника зажигания	Твердые <i>органические</i> : древесина ² , уголь, торф, каучук ³ , хлопок, картон, резина ⁴ , стеариновая кислота ⁵ и др.; <i>неорганические</i> : металлы (калий, натрий, литий, алюминий и др. и их соединения); <i>неметаллические</i> : (сера, фосфор, кремний и др. и их соединения), в том числе пыли (органические – угольная, древесная, сахарная, муčná и др.; неорганические – железная, алюминиевая, кремниевая, серная и др.)
		Жидкие: нефть и нефтепродукты ⁶ , спирты ⁷ , кислоты ⁸ , парафины ⁹ , углеводороды ¹⁰ и др., в том числе синтетические материалы, плавящиеся при нагревании
		Газообразные: водород, углеводороды ¹¹ , аммиак и др., а также пары горючих жидкостей

Группа горючести	Определение согласно ГОСТ	Примеры веществ и материалов
2.Трудногорючие	Способные возгораться в воздухе от источника зажигания, но не способные гореть после его удаления	Состоящие из горючих и негорючих материалов: стеклотекстолит СК-9А, стеклотекстолит ФН-Ф, фетр, пенобетоны с наполнителем из полистирола, трихлорэтилен C_2HCl_3 , слабые водные растворы спиртов и др.
3. Негорючие	Не способные к горению в воздухе	Ткань асбестовая, ткань асбесто-стеклянная, пеноасбест, металлы, применяемые в строительстве, строительные материалы: песок, глина, гравий, цемент и изделия из них (кирпич, бетон) и др.

Примечания:

¹Самовозгорание – горение, возникшее при отсутствии видимого источника зажигания. К самовозгоранию способны, например, промасленная ветошь, металлические стружки, древесные опилки, желтый фосфор, пары жидкого фосфористого водорода P_2H_4 .

²Древесина в основном состоит из клетчатки $(C_6H_{10}O_5)_n$.

³Каучук – непредельный углеводород $(C_5H_8)_x$, где $x = 1000...3000$.

⁴Резина – каучук после смешивания с серой, подвергшийся вулканизации (нагревание до определенной температуры).

⁵Стеариновая кислота $C_{18}H_{36}O_2$ (или $C_{17}H_{35}COOH$) – горючее твердое вещество – составная часть сала.

⁶Нефтепродукты: бензин, керосин, лигроин, дизельное топливо, смазочные масла, мазут и др.

⁷Спирты: метиловый CH_4O , этиловый $C_2H_6O(C_2H_5OH)$, н-пропиловый C_3H_8O ; н-бутиловый $C_4H_{10}O$; н-амиловый $C_5H_{12}O$ и др.

⁸Кислоты: муравьиная (метановая) $C_2H_2O_2$; уксусная (этановая) $C_2H_4O_2$; олинная (октадеценная) O_2 и др.

⁹Парафины, условная формула $C_{26}H_{54}$, бывают жидкие и твердые (расплавляются при нагревании), получают из некоторых сортов нефтепродуктов.

¹⁰Жидкие углеводороды: предельные (алканы: пентан C_5H_{12} , гексан C_6H_{14} и др.); непредельные (алкены: 1-пентен C_5H_{10} , 1-гексен C_6H_{12} , октен-1 C_8H_{16} и др.); циклические (нафтенy: циклопентан $(CH_2)_5$, циклооктан (C_2H_8) и др.; ароматические (бензол C_6H_6 , толуол C_7H_8 и др.).

¹¹Газообразные углеводороды: предельные (алканы: метан CH_4 , этан C_2H_6 , пропан C_3H_8 , бутан C_4H_{10} и др.); непредельные (этилен C_2H_4 , пропилен C_3H_6 , бутилен C_4H_8 и др.).

К легковоспламеняющимся газам относятся практически все горючие газы, например, H_2 , NH_3 , CO , C_3H_8 , природный газ и др.).

К *легковоспламеняющимся жидкостям* (ЛВЖ) относятся горючие жидкости с $t_{\text{вспыш}}$ не $> 61\text{ }^{\circ}\text{C}$ в закрытом тигле (з.т.) или $66\text{ }^{\circ}\text{C}$ в открытом тигле (о.т.), ЛВЖ по пожароопасности можно разделить на три группы:

- 1) особо опасные;
- 2) постоянно опасные;
- 3) опасные при повышенной температуре.

К особо опасным ЛВЖ относятся, например, ацетон $\text{C}_2\text{H}_6\text{O}$, бензин – Б70, изопентан C_5H_{12} , диэтиловый эфир $\text{C}_4\text{H}_{10}\text{O}$, имеющие $t_{\text{вспыш.}}$ не $> 18\text{ }^{\circ}\text{C}$ (з.т.) или $13\text{ }^{\circ}\text{C}$ (о.т.). В жару внутри сосуда повышается давление, при нарушении герметичности пары этих жидкостей способны распространяться на значительном расстоянии от сосуда, вызывая пожар.

Постоянно опасными ЛВЖ являются, например, бензол C_6H_6 , толуол C_7H_8 , этиловый спирт $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$, диоксан $\text{C}_4\text{H}_8\text{O}_2$, этилацетат $\text{C}_4\text{H}_8\text{O}_2$ с $t_{\text{вспыш}}$ от $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+23\text{ }^{\circ}\text{C}$ (в закрытом тигле) или от $-13\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $27\text{ }^{\circ}\text{C}$ (в открытом тигле) характеризуются способностью образовывать взрывоопасную среду в паровоздушной фазе закрытых сосудов.

К опасным при повышенной температуре ЛВЖ относятся, например, уайт-спирит $\text{C}_{10,5}\text{H}_{21,3}$, осветительный керосин, хлорбензол $\text{C}_6\text{H}_5\text{Cl}$, сольвент, скипидар и др., имеющие температуру вспышки выше $23\text{ }^{\circ}\text{C} \dots 61\text{ }^{\circ}\text{C}$ (в закрытом тигле) или $27\text{ }^{\circ}\text{C} \dots 66\text{ }^{\circ}\text{C}$ (в открытом тигле). В горячих цехах при высокой температуре пары этих жидкостей могут воспламеняться в воздухе, при обычной температуре ($\sim 20\text{ }^{\circ}\text{C}$) эти вещества воспламеняются только при наличии источника зажигания.

Эти особенности предъявляют дополнительные требования безопасности к их транспортировке, хранению и применению.

Легковоспламеняющиеся твердые вещества (материалы): целлулоид, полистирол, древесная стружка, торфоплиты (возгораются от пламени спички, спиртовки, газовой горелки).

Средней воспламеняемости: древесина, уголь, бумага в пачках, ткань в рулонах (необходим источник зажигания с высокой энергией, способной прогреть до температуры воспламенения).

Трудновоспламеняющиеся: мочеви́на (карбамид) CH_4ON_2 , гетинакс марки В (прессованная бумага, обработанная синтетической смолой резольного типа), древесина после огнезащитной обработки, полихлорвиниловая плита.

Особый класс горючих веществ – пирофорные и ВВ вещества.

Пирофорные – способны самовоспламеняться на открытом воздухе (жидкий фосфор, жидкий фосфористый водород P_2H_4 и др.).

ВВ – вещества, способные к быстрому экзотермическому превращению с образованием сжатых газов (взрыву) без участия кислорода воздуха (нитроглицерин, нитрометан, тринитротолуол $\text{C}_6\text{H}_2(\text{N}_2\text{O})_3\text{CH}_3$, аммиачная селитра NH_4NO_3).

Трудногорючие вещества. Такие вещества неоднородны по пожарной опасности и делятся на три группы.

Первая группа: горение возможно лишь при наличии мощного источника зажигания, например, при пожаре.

Вторая группа: способна при нагревании выделять горючие пары и газы, имеющие определенную область воспламенения.

Третья группа: некоторые ВВ – нитрат аммония NH_4NO_3 ,
 $\text{NH}_4\text{NO}_3 \rightarrow \text{HNO}_3 + \text{NH}_3 - 170 \text{ кДж}$ (при нагревании).

Выделяющийся NH_3 способен гореть (но если источник убрать – процесс прекратиться).

Иначе протекает процесс, если нитрат аммония подвергается действию теплового импульса или мощного детонатора:



Негорючие вещества. Отнесение многих веществ и материалов к группе негорючих в значительной степени условно, так как речь идет о горении в атмосферном воздухе (содержание $\text{O}_2 \sim 21\%$ об.). Однако эти вещества могут взаимодействовать при контакте с озоном (O_3), фтором F_2 , жидким кислородом.

Кроме того, есть несколько групп негорючих веществ, которые являются пожароопасными:

- окислители: KMnO_4 , Cl_2 , HNO_3 , O_2 жидк., Na_2O_2 , H_2O_2 и др.;
- вещества, выделяющие горючие продукты при взаимодействии с водой и друг с другом (карбид кальция CaC_2 , Na, негашеная известь, CaO , $\text{H}_2\text{SO}_4 + \text{Me} \rightarrow \text{H}_2$ (горит);
- термически нестойкие вещества (карбонат аммония),
 $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3 \rightarrow \text{H}_2\text{CO}_3 + 2\text{NH}_3$;
- вещества, способные к взрывчатому превращению без участия кислорода воздуха (нагрев или удар), $4\text{BaN}_6 \rightarrow \text{Ba} + \text{Ba}_3\text{N}_2 + 11\text{N}_2 + 297 \text{ кДж}$.

1.8. Показатели пожаро- и взрывоопасности веществ и материалов

Пожаровзрывоопасность веществ и материалов – совокупность свойств, характеризующих их способность к возникновению и распространению горения и определяется показателями, выбор которых зависит от агрегатного состояния вещества (материала) и условий его применения (табл. 1.3).

При определении пожаровзрывоопасности веществ и материалов различают:

газы – вещества, давление насыщенных паров которых при температуре 25°C и давлении $101,3 \text{ кПа}$ превышает $101,3 \text{ кПа}$;

жидкости – вещества, давление насыщенных паров которых при температуре 25°C и давлении $101,3 \text{ кПа}$ меньше $101,3 \text{ кПа}$. К жидкостям так-

же относятся твердые плавящиеся вещества, температура плавления или каплепадения которых меньше 50 °С;

твердые вещества и материалы – индивидуальные вещества и их смеси с температурой плавления или каплепадения больше 50 °С, а также вещества не имеющие температуру плавления (например, древесина, ткани и т. п.);

пыли – дисперсированные твердые вещества и материалы с размером частиц менее 850 мкм.

Таблица 1.3

Номенклатура показателей и их применимость для характеристики пожаровзрывоопасности веществ и материалов

Показатель	Агрегатное состояние			
	газы	жидкости	твердые	пыли
Группа горючести	+	+	+	+
Температура вспышки	–	+	–	–
Температура воспламенения	–	+	+	+
Температура самовоспламенения	+	+	+	+
Концентрационные пределы распространения пламени (воспламенения)	+	+	–	+
Температурные пределы распространения пламени (воспламенения)	–	+	–	–
Температура тления	–	–	+	+
Условия теплового самовозгорания	–	–	+	+
Минимальная энергия зажигания	+	+	–	+
Кислородный индекс	–	–	+	–
Способность взрываться и гореть при взаимодействии с водой, кислородом воздуха и другими веществами	+	+	+	+
Нормальная скорость распространения пламени	+	+	–	–
Скорость выгорания	–	+	–	–
Коэффициент дымообразования	–	–	+	–
Индекс распространения пламени	–	–	+	–
Показатель токсичности продуктов горения полимерных материалов	–	–	+	–
Минимальное взрывоопасное содержание кислорода	+	+	–	+
Минимальная флегматизирующая концентрация флегматизатора	+	+	–	+
Максимальное давление взрыва	+	+	–	+
Скорость нарастания давления взрыва	+	+	–	+

Примечание. Знак «+» обозначает применяемость, знак «–» неприменяемость показателя.

Горючесть – способность вещества и материалов к горению. По способности к горению или по горючести вещества и материалы подразделяются на три группы: негорючие, трудногорючие и горючие (сгораемые). Классификация веществ и материалов по горючести нами рассмотрена ранее.

Температура вспышки – наименьшая температура конденсированного вещества, при которой в условиях специальных испытаний над его поверхностью образуются пары, способные вспыхнуть на воздухе от источника зажигания; устойчивое горение при этом не возникает.

Температура воспламенения – наименьшая температура вещества, при которой в условиях специальных испытаний вещество выделяет горючие пары и газы с такой скоростью, что при воздействии на них источника зажигания наблюдается воспламенение (продолжающееся пламенное горение после удаления источника зажигания).

Температура самовоспламенения – наименьшая температура окружающей среды, при которой в условиях специальных испытаний наблюдается самовоспламенение вещества (самовоспламенение – резкое увеличение скорости экзотермических объемных реакций, сопровождающееся пламенным горением и (или взрывом) без непосредственного контакта с огнем).

Концентрационные пределы распространения пламени (воспламенения) – нижний (НКПР), верхний (ВКПР). НКПР, ВКПР – минимальное (максимальное) содержание горючего вещества в однородной смеси с окислительной средой, при котором возможно распространение пламени по смеси на любое расстояние от источника зажигания.

Температурные пределы распространения пламени (воспламенения) – такие температуры вещества, при которых его насыщенный пар образует в окислительной среде концентрации, равные соответственно нижнему (нижний температурный предел) и верхнему (верхний температурный предел) концентрационным пределам распространения пламени.

Температура тления – температура вещества, при которой происходит резкое увеличение скорости экзотермических реакций окисления, заканчивающихся возникновением тления. В свою очередь, тление – беспламенное горение твердого вещества (материала) при сравнительно низких температурах (400°...600 °С), часто сопровождающееся выделением дыма.

Условия теплового самовозгорания – экспериментально выявленная зависимость между температурой окружающей среды, количеством вещества (материала) и временем его самовозгорания (самовозгорание – резкое увеличение скорости экзотермических процессов в веществе, приводящее к возникновению очага горения).

Минимальная энергия зажигания – наименьшая энергия электрического разряда, способная воспламенить наиболее легковоспламеняющуюся смесь горючего вещества с воздухом.

Кислородный индекс – минимальное содержание кислорода в кислородно-азотной смеси, при котором возможно свечеообразное горение материала в условиях специальных испытаний.

Способность взрываться и гореть при взаимодействии с водой, кислородом воздуха и другими веществами (взаимный контакт веществ) – это качественный показатель, характеризующий особую пожарную опасность некоторых веществ.

Нормальная скорость распространения пламени – скорость перемещения фронта пламени относительно несгоревшего газа в направлении перпендикулярном к его поверхности.

Скорость выгорания – количество жидкости, сгорающей в единицу времени с единицы площади. Этот показатель характеризует интенсивность горение жидкости.

Коэффициент дымообразования – показатель, характеризующий оптическую плотность дыма, образующегося при пламенном горении или тлении определенного количества твердого вещества.

Индекс распространения пламени – условный безразмерный показатель, характеризующий способность веществ воспламеняться, распространять пламя по поверхности и выделять тепло.

Показатель токсичности продуктов горения полимерных материалов – отношение количества материалов к единице объема замкнутого пространства, в котором образующиеся при горении материала газообразные продукты вызывают гибель 50% подопытных животных.

Минимальное взрывоопасное содержание кислорода – такая концентрация кислорода в горючей смеси, состоящей из горючего вещества, воздуха и флегматизатора, меньше которой распространение пламени в смеси становится невозможным при любой концентрации горючего в смеси, разбавленной данным флегматизатором.

Максимальное давление взрыва – наибольшее избыточное давление, возникающее при дефлограционном сгорании газо-, паро- или пылевоздушной смеси в замкнутом сосуде при начальном давлении смеси 101,3 кПа.

Скорость нарастания давления взрыва – производная давления взрыва по времени на восходящем участке зависимости давления взрыва горючей смеси в замкнутом сосуде от времени.

Методы определения перечисленных показателей пожаровзрывоопасности веществ и материалов подробно изложены в вышеупомянутом ГОСТ 12.1.044-89 ССБТ. Номенклатура показателей и методы их определения [3].

Необходимо заострить внимание на процессах самовозгорания веществ и материалов (горение, возникающее при отсутствии внешнего источника зажигания), так как его опасность заключается именно в том, что горение возникает при отсутствии видимого источника зажигания.

В зависимости от внутреннего импульса процессы самовозгорания можно условно разделить на три вида:

- 1) химические самовозгорания;
- 2) микробиологические;
- 3) тепловые.

Химическое самовозгорание происходит, главным образом за счет увеличения скорости химической реакции с возрастанием температуры. Недостаточный теплоотвод способствует нагреву материала в результате окислительных процессов и соответственно достижению критических условий возникновения горения.

Самовозгорающиеся химические вещества подразделяются на три основные группы:

- вещества, самовозгорающиеся при взаимодействии с воздухом: щелочные металлы (литий, калий, натрий, рубидий, цезий), сульфиды щелочных и щелочноземельных металлов (например, кальция CaS , калия K_2S : $\text{K}_2\text{S} + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{K} + \text{SO}_2$), белый и красный фосфор. Самовозгорание олиф, растительных масел и жиров, связано с их химическим строением (наличие двойных связей). В связи со способностью масел и жиров самовозгораться, большую опасность представляют промасленная одежда и обтирочные материалы (поверхность чрезвычайно велика). О склонности масел и жиров к самовозгоранию судят по иодному числу (количество иода в граммах, поглощенное 100 г испытуемого вещества). Чем больше иодное число, тем ниже его температура самовозгорания;

- вещества, самовозгорающиеся при взаимодействии с водой: щелочные металлы, карбиды щелочных металлов (наиболее распространенный $\text{CaC}_2 + \text{H}_2\text{O} = \text{C}_2\text{H}_2 + \text{CaO}$), сернистый натрий Na_2S и другие вещества. Образующегося при этом тепла достаточно для воспламенения образующихся газов (H_2 , C_2H_2 , CH_4 , пропан C_3H_8 и др.);

- вещества, самовозгорающиеся при взаимодействии друг с другом: окислители (например, азотная кислота $4\text{HNO}_3 \rightarrow 4\text{NO}_2 + \text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$). При обычной температуре в присутствии смесей азотной кислоты и продуктов ее разложения (кислород, двуокись азота, тетраоксид азота N_2O_4) самовозгорается большинство горючих веществ (особенно органические соединения). Серная кислота H_2SO_4 также является сильным окислителем. Большая часть органических соединений при взаимодействии с H_2SO_4 обугливается. Смесь концентрированных HNO_3 и H_2SO_4 (меланж) сильнейший окислитель. При взаимодействии меланжа с органическими веществами могут образовываться даже ВВ. Хлорная кислота HClO_4 также вызывает самовозгорание органических веществ. Сильными газообразными окислителями являются галогены (F, Cl, Br, J) и их соединения. Они также вызывают самовозгорание органических веществ. К твердым неорганиче-

ским окислителям, вызывающим самовозгорание, относятся, например, перхлораты, хлораты, нитраты, перманганаты, дихроматы, хроматы и др.

Микробиологическое самовозгорание происходит при соответствующей влажности и температуре в продуктах растительного происхождения. Особенно склонны к самовозгоранию недосушенные материалы (сено, опилки, листья, хлопок и т. д.), так как влага и тепло способствуют активному размножению микроорганизмов (уже при температуре 10 °С...18 °С). К разогреву также приводит низкая теплопроводность растительных продуктов. При $t \geq 75^\circ$ микроорганизмы, как правило, погибают, но некоторые органические вещества обугливаются. Образующийся при этом пористый уголь адсорбирует пары и газы и процесс самовозгорания продолжается. Для предотвращения самовозгорания осуществляют регулярный контроль температуры, ограничивают влажность и размеры штабелей.

Тепловое самовозгорание присуще дисперсным веществам, обладающим сильно развитой поверхностью, способным адсорбировать кислород и вступать с ним в реакцию (ископаемые угли). Самовозгоранию углей способствует их измельченность, а также наличие примесей пирита и влаги. Температура 60 °С считается критической для самовозгорания углей, так как при дальнейшем нагреве резко увеличивается скорость самовозгорания.

Главнейшим фактором теплового самовозгорания является температура, до которой нагреваются вещества. Самовозгорание сопровождающееся появлением пламени называется **самовоспламенением**.

Как уже упоминалось, частным случаем горения является взрыв.

Взрыв – это чрезвычайно быстрое горение, при котором происходит выделение энергии и образование сжатых газов, способных производить механическую работу. Различают: взрывное горение и детонацию.

Взрывное горение – взрывы газо-, паро- или пылевоздушных смесей (скорость горения несколько сотен м/с).

Детонация (скорость горения несколько км/с). Давление развивается до 10^5 МПа, плотность продуктов детонации приближается к плотности твердых веществ ($\sim 1400...1600$ кг/м³). В условиях детонации достигается максимальное разрушительное действие взрыва.

2. ОСОБЕННОСТИ ГОРЕНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ВЕЩЕСТВ И МАТЕРИАЛОВ

Наряду с физико-химическими свойствами горючего и окислителя, процесс горения в той или иной степени зависит от условий окружающей среды: температуры, давления, скорости движения и других параметров воздуха. Поэтому, горение газов, жидкостей, твердых веществ и их пылей имеет свои особенности [1, 2, 6–8].

2.1. Горение газов

При нормальном давлении и температуре среднее расстояние между молекулами в газе приблизительно в 10 и более раз больше, чем в жидкостях и твердых телах, поэтому плотность газов значительно ниже плотности жидкостей и твердых веществ.

Практически все горючие газы относятся к классу легковоспламеняющихся, их горение относится к гомогенному (одинаковое агрегатное состояние) и процесс горения определяется областью воспламенения, энергией источника зажигания, температурой горения и скоростью распространения пламени (рис. 2.1).

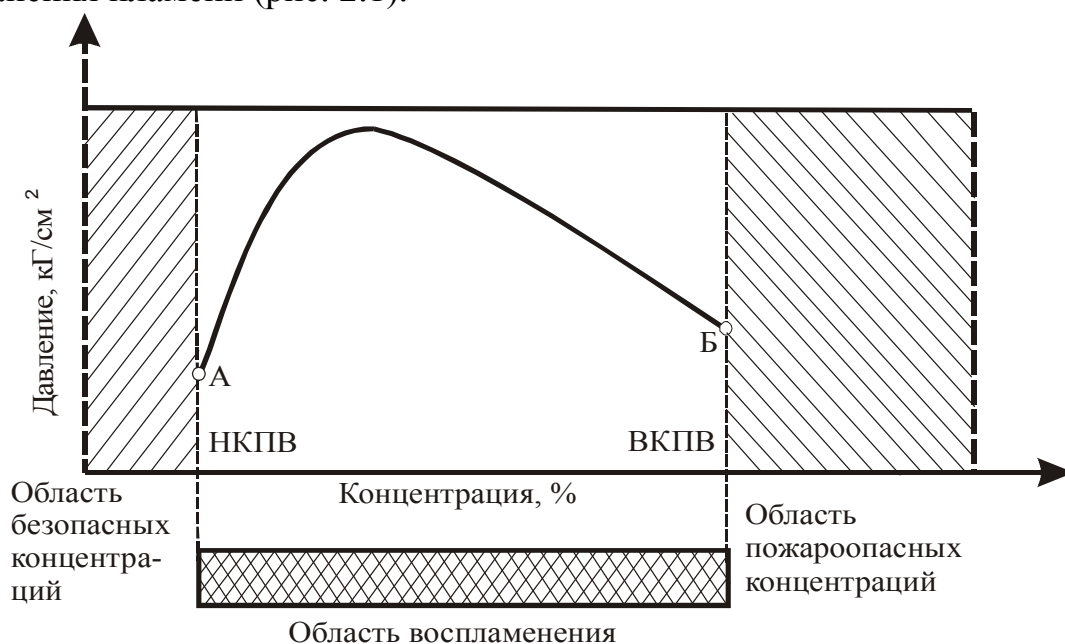


Рис. 2.1. Зависимость давления при взрыве горючих газопаровоздушных смесей от концентрации горючего в смеси

Все смеси горючего с воздухом до точки «А» не способны воспламениться даже от мощной электрической искры — это область безопасных концентраций. Та минимальная концентрация газов или паров, при которой смесь воспламеняется от постороннего источника зажигания с последующим распространением по всему объему смеси, называется **нижним концентрационным пределом воспламенения (НКПВ)**.

На НКПВ смесь воздуха с горючим содержит избыток воздуха. Так, для смеси воздуха с метаном коэффициент избытка воздуха равен 2; с CO – 2,6; с H₂S – 6,9.

При концентрации горючего в смеси выше НКПВ горение проходит с большой скоростью, давление при взрыве повышается вплоть до давления, соответствующего стехиометрической концентрации веществ.

Снижение концентрации воздуха в смесях с горючим (так называемые богатые смеси) ведет к снижению и потере способности воспламеняться. Та наивысшая концентрация горючих газов или паров в смеси, при которой смесь еще воспламеняется от постороннего источника зажигания с распространением горения по всему объему смеси, называется **верхним концентрационным пределом воспламенения (ВКПВ)**.

Диапазон концентраций газа или пара в воздухе между НКПВ и ВКПВ называется *областью воспламенения*.

Концентрации горючих газов и паров с воздухом выше ВКПВ называются пожароопасными.

Знание областей безопасных и пожароопасных концентраций дает возможность в процессе применения и хранения горючих газов и жидкостей поддерживать такой режим, при котором концентрации горючего были бы выше ВКПВ или ниже НКПВ.

Области воспламенения смесей конкретных горючих газов или паров с воздухом не являются абсолютно постоянными и зависят от многих факторов (температуры смеси, давления, влажности воздуха, различных примесей, турбулентности, мощности источника зажигания и др.).

Влияние температуры смеси. Повышение температуры однозначно расширяет область воспламенения смесей горючего с воздухом. По данным Уайта смесь водорода с воздухом имеет пределы области воспламенения при 20 °C от 9% до 72%, при 400 °C – от 6,3% до 82%. Среднестатистически установлено, что с повышением температуры от 20 °C до 120 °C НКПВ в среднем снижается на 8...10%, а ВКПВ повышается на 12...16%.

Влияние давления смеси. Изменение давления в пределах нормальных колебаний близкого к атмосферному давлению при оптимальном значении 101 325 Па (или 760 мм.рт.ст.) практически не влияет на пределы горючести.

При больших колебаниях давления пределы горючести изменяются по-разному для различных смесей. В общем случае, уменьшение давления ниже атмосферного сужает пределы области воспламенения: при некотором достаточно низком давлении ВКПВ и НКПВ совпадают, т. е. существует минимальное давление, ниже которого при любом составе смеси зажигание невозможно и смесь не способна к распространению пламени.

Следует отметить, что область горючести (область воспламенения) смеси газов с кислородом шире, чем для газозвоздушной смеси и увеличение НКПВ с кислородом незначительно по сравнению с ростом величины ВКПВ.

Влажность воздуха. Влага, входящая в состав воздуха оказывает слабое влияние на пределы горючести. ВКПВ для метано-воздушной смеси в присутствии воды несколько снижается (для сухой – 15%, для влажной – 14,5%), так как пары H_2O замещают часть кислорода. Особое положение занимает окись углерода. Для нее влияние влажности более значительно (от 15,9% до 13,1%).

Содержание примесей, замедляющих реакции горения. Некоторые примеси оказывают существенное влияние на пределы горючести. Различают две группы таких примесей: ингибиторы и разбавители.

Ингибиторы – галогенуглеводороды. Уже при небольшом содержании они делают негорючими смеси оксида, водорода или углеводородов с воздухом. Основную роль здесь играет влияние ингибитора на уменьшение скорости реакции и, следовательно, к увеличению теплотерь.

Добавление инертных газов – разбавителей сужает пределы области воспламенения и при определенных соотношениях делает смесь негорючей. Это влияние в общем пропорционально теплоемкости добавки. Так, углекислый газ CO_2 , имеющий большую величину теплоемкости по отношению к азоту N_2 , снижает горючесть сильнее.

Для смесей, содержащих несколько горючих газов, предел горючести (НКПВ, ВКПВ) можно определить по формуле Ле Шателье, основанной на предположении аддитивности горючести газов:

$$\frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} + \dots + \frac{n_k}{N_k} = 1,$$

где $N_1, N_2, \dots, N_k$ – пределы горючести для каждого горючего газа в отдельности; $n_1, n_2, \dots, n_k$ – процентное соединение газа в смеси соответственно НКПВ и ВКПВ.

Путем простого преобразования формула приводится к виду:

$$\varphi_n = \frac{100}{\frac{m_1}{N_1} + \frac{m_2}{N_2} + \dots + \frac{m_k}{N_k}}, \% \text{ (об)},$$

где φ_n – суммарное процентное содержание горючих газов в смеси их с воздухом, соответствующее НКПВ или ВКПВ; $m_1, m_2, \dots, m_k$ – процентное содержание каждого горючего в исходной смеси горючих газов, $\Sigma m = 100\%$.

Пример. Рассчитать НКПВ природного газа следующего состава в % (об): метана 80 (НКПВ – 5,28%), этана – 15 (НКПВ – 2,90%), пропана 4 (НКПВ – 2,30%), бутана – 1 (НКПВ – 1,80%):

$$\varphi_n = \frac{100}{\frac{80}{5,28} + \frac{15}{2,90} + \frac{4}{2,30} + \frac{1}{1,80}} = 4,42\% \text{ (об)}.$$

Энергия зажигания (мощность источника зажигания). *Минимальная энергия зажигания* – наименьшее значение энергии искры электрического разряда, способной воспламенить наиболее легковоспламеняющуюся смесь данного газа, пара или пыли с воздухом.

При экспериментальном определении НКПВ и ВКПВ учитывают изменение воспламеняемости смеси в зависимости от ее состава. Количественной характеристикой воспламеняемости может служить минимальная величина энергии поджигающего импульса, достаточная для возникновения горения.

Сущность экспериментального определения энергии зажигания заключается в зажигании газо-, паро- или пылевоздушной смеси конкретной концентрации электрическим разрядом определенной энергии в объеме реакционного сосуда.

Минимальная энергия искрового разряда, необходимая для нагрева шарообразного объема горючей смеси радиусом r от начальной температуры T_0 до температуры горения $T_{гор}$ определяется по формуле

$$W_{min} = 4/3 \pi \cdot r^2 C_p \cdot \rho (T_{гор} - T_0) \text{ Дж},$$

где C_p – теплоемкость смеси при постоянном давлении, Дж/(кг·К);
 ρ – плотность смеси, кг/м³.

Инициирование горения газовой смеси в одной точке приводит к нагреву близлежащих слоев, в которых зарождается химическая реакция. Сгорание этих слоев влечет за собой инициирование горения следующих и т. д. до полного выгорания горючей смеси. Фронт пламени – зона горения. Толщина фронта пламени – несколько десятых долей миллиметра. Изменение давления оказывает на минимальную энергию зажигания несколько большее влияние, чем изменение температуры (при $P = 100$ кПа, $W_{min} = 25$ мДж; при $P = 330$ кПа, $W_{min} = 2,2$ мДж) для метано-воздушной смеси. W_{min} зависит также от природы горючего. Например, для водорода составляет 0,017, для этана – 0,24, а для аммиака – 680 мДж.

Температура горения. *Температура горения* ($T_{\text{гор.}}$) – температура, до которой нагреваются при горении продукты сгорания без учета потерь тепла (теоретическая температура горения) или с учетом потерь тепла (действительная температура горения).

Максимальную температуру горения можно вычислить по формуле

$$T_{\text{гор}} = \frac{Q - \Delta Q}{\sum C_p}, \text{ К},$$

где Q – количество тепла, выделяющееся при горении, Дж; ΔQ – потери тепла, Дж; $\sum C_p$ – сумма теплоемкости продуктов сгорания, Дж/К.

Температуры горения некоторых газов в смесях с воздухом и кислородом достаточно высоки (до 3000 °С), что вызывает тепловое самоускорение реакции (т. е. происходит саморазогрев системы «горючее – окислитель»).

Скорость горения. Нормальная скорость горения – скорость перемещения фронта реакции относительно несгоревшего газа в направлении нормали к поверхности фронта пламени (см/с; м/с).

Массовая скорость горения смеси – количество вещества, воспламеняющееся на единице поверхности пламени в единицу времени (г/см²·с).

Нормальная скорость горения зависит от состава смеси, давления, начальной температуры и наличия примесей:

- состав: по мере приближения к пределам ВКПВ и НКПВ скорость падает, но не равна нулю;
- повышение давления может по-разному влиять на скорость, часто наблюдается понижение скорости;
- повышение температуры увеличивает скорость (относительно слабо);
- примеси: *инертные* уменьшают скорость горения; *активные* (например, вода сильно ускоряет реакцию окисления оксида углерода с кислородом, а при большом ее количестве – скорость горения падает).

Анализ аварий в химической, добывающей и многих других отраслях промышленности показывает, что взрывы газо- и паровоздушных смесей, занимают одно из ведущих мест. Для предаварийного состояния характерно образование взрывоопасных смесей горючих газов или паров горючих жидкостей с воздухом, при наличии источника зажигания горение таких смесей практически мгновенно переходит во взрывное. Это может происходить как в аппаратах и коммуникациях, так и в производственных зданиях и на территориях.

Пожаро- и взрывоопасность газов зависит от их свойств. Наиболее пожаро-взрывоопасными являются газы, имеющие широкую область воспламенения, низкий НКПВ, небольшую энергию зажигания, большую нормальную скорость распространения пламени. К таким газам относятся, например, ацетилен, водород, сероводород и др.

2.2. Горение жидкостей

Жидкости – вещества в конденсированном агрегатном состоянии, промежуточном между твердым и газообразным. В жидкостях расстояние между молекулами – порядка размеров самих молекул, а силы межмолекулярного взаимодействия весьма значительны.

Процесс горения жидкостей начинается с воспламенения паро-воздушной смеси. Стационарный процесс горения устанавливается только при определенной температуре жидкости, однако, и при более низких температурах жидкости уже могут представлять пожарную опасность, так как над поверхностью их может создаться взрывоопасная концентрация паров.

Горение жидкостей характеризуется двумя взаимосвязанными процессами – испарением и собственно сгоранием паро-воздушной смеси над поверхностью жидкости. Зоной горения является тонкий светящийся слой газов, в который с поверхности жидкости поступают горючие пары, а из воздуха диффундирует кислород. Образующаяся стехиометрическая смесь сгорает мгновенно. Испарению принадлежит исключительно важная роль, поскольку в конечном итоге оно определяет скорость сгорания жидкости.

Таким образом, все горючие жидкости способны испаряться и горение их происходит в паровой фазе. Количество пара зависит от состава и температуры жидкости. Процесс горения паров определяется областью воспламенения (интервал между НКПВ и ВКПВ), энергией источника зажигания, температурой горения и скоростью распространения пламени (по аналогии с горением газов).

Важнейшей характеристикой жидкости, определяющей процесс горения, является температура кипения.

У химически однородных веществ (индивидуальных соединений, в частности, углеводородов) температура кипения остается постоянной, у сложных смесей (например, моторных топлив) она изменяется, повышаясь по мере выкипания более легколетучих компонентов.

Температура кипения индивидуальных углеводородов при атмосферном давлении определяется по формуле

$$t_{\text{кип}} = 10\sqrt{10M - 375} - 150, \text{ }^{\circ}\text{C}$$

где M – молекулярная масса вещества.

Как правило, НКПВ для паров горючих жидкостей ниже, чем для большинства горючих газов, поэтому пары жидкости более пожаро- и взрывоопасны. Область воспламенения горючих жидкостей, как правило, уже, чем у горючих газов.

Температура вспышки – наименьшая температура жидкости, при которой ее пары воспламеняются от источника зажигания без последующего устойчивого горения. При температуре вспышки жидкость становится опасной в пожарном отношении.

Температурными пределами воспламенения паров в воздухе называются такие температуры вещества, при которых концентрация его паров в воздухе равны соответственно НКПВ и ВКПВ.

Температурные пределы воспламенения применяют при расчетах безопасных температурных режимов работы закрытых технологических аппаратов с жидкостями.

Сжиженные горючие газы (СГГ). СГГ широко применяют в качестве технологического сырья и топлива. Существует два основных способа хранения газов:

- при постоянном давлении и изменяемом объеме;
- при переменном давлении и постоянном объеме.

Для каждого конкретного сжиженного газа существуют оптимальные условия хранения – температура и давление в емкости.

Состояние вещества, при котором исчезает различие между его жидкой и газообразной фазами, называется *критическим*. Оно возникает при определенном давлении и температуре, называемых критическими:

- критическая температура – температура, выше которой вещество не может находиться в жидком состоянии;
- критическое давление – давление, при котором еще сохраняется возможность сжижения газообразной фазы.

Объем, который занимает вещество в критическом состоянии, называется критическим.

Критические параметры вещества связаны следующим соотношением:

$$\frac{P_{кр} \cdot U_{кр}}{R \cdot T_{кр}} = Z_{кр},$$

где $R = 8,314$ Дж/(моль·К) – универсальная газовая постоянная; $Z_{кр}$ – константа, равная 0,375 (для газов); 0,27 (для паров углеводородов тяжелее пропана).

Криогенные вещества – вещества, у которых критическая температура ниже температуры окружающей среды. Хранение и транспортировка их – в криогенных сосудах.

При разгерметизации сосуда поведение криогенной жидкости подобно поведению воды, налитой на раскаленную поверхность (капли парят над поверхностью).

Различают еще три состояния (кроме криогенного):

- вещества, у которых критическая температура выше, а точка кипения ниже окружающей среды (они отличаются способностью к «мгновенному испарению»);
- вещества, у которых критическое давление выше атмосферного и точка кипения выше температуры окружающей среды (при атмосферном давлении такие вещества находятся в жидком состоянии);
- вещества, содержащиеся при повышенных температурах (водяной пар в котлах).

2.3. Горение твердых веществ

В условиях большинства пожаров, наряду с жидкими и газообразными веществами, горят и твердые вещества, которые широко применяются в промышленности и в быту. К ним относятся органические и неорганические вещества и материалы:

- органические: на основе целлюлозы (древесина, хлопок, х/б ткани, бумага и т. д.):
 - ископаемые твердые вещества (бурый уголь, каменный уголь, торф);
 - материалы на основе углеводов и их производных (резина, пластмассы, химические волокна и ткани и др.);
 - продукты питания (зерно, зернопродукты, жиры, сахар и др.).
- неорганические:
 - металлы (калий, натрий, магний, Al, Ti и др.);
 - неметаллы (сера, фосфор, кремний).

Горение твердых веществ отличается от горения газов наличием стадии разложения и газификации. Горение в среде газообразного окислителя чаще всего происходит в результате воспламенения летучих продуктов пиролиза (разложение, деструкция) и имеет многостадийный характер. Под воздействием тепла происходит нагрев твердой фазы → разложение и выделение газообразных (летучих) продуктов → они воспламеняются и горят → тепло нагревает поверхность твердого вещества, вызывая поступление в зону горения новых порций горючих газов.

2.3.1. Горение органических материалов

К классу органических относятся вещества, состоящие в основном из углерода, водорода, кислорода и азота. В их состав могут также входить фтор, хлор, кремний и др. элементы.

Целлюлозные материалы – наиболее распространенные. В их состав кроме C, H₂ входит, как правило, и O₂, который участвует в процессе горения (поэтому воздуха, естественно, требуется меньше).

Целлюлозные материалы способны при нагревании разлагаться с образованием паров, газов и углеродистого остатка. Количество и состав образующихся при этом газообразных продуктов зависят от температуры и режима нагревания горючих веществ. Газообразные продукты при нагревании твердых веществ образуются в определенном интервале температур и с переменной скоростью, причем при разложении разных горючих материалов выделяется разное количество газообразных продуктов. Состав продуктов также непостоянен и изменяется в зависимости от температуры разложения.

При низких температурах преобладает диоксид углерода и водяной пар, при более высоких температурах образуются горючие газы: водород, метан и др. (коксование углей).

Горение древесины. Древесина является самым распространенным горючим материалом в условиях пожара. По структуре она представляет собой пористый материал с множеством ячеек, заполненных воздухом. Стенки ячеек состоят из целлюлозы и лигнина. Объем пустот в древесине превышает объем твердого вещества (пористость: дуба – 56,6%, березы – 62,6%, сосны – 69,3%, ели – 72,0%).

Характер строения древесины определяет ее низкую теплопроводность, быструю воспламеняемость и медленный прогрев внутренних слоев.

При контакте древесины с пламенем быстро нагревается тонкий поверхностный слой – испаряется влага и начинается разложение: до температуры ~ 250 °С в продуктах разложения содержатся, в основном, водяной пар, диоксид углерода и очень мало горючих газов практически неспособных гореть (ниже НКПВ). При температурах 250...600 °С – в летучих продуктах содержится в основном диоксид углерода и метан, они воспламеняются от источника зажигания и древесина начинает самостоятельно гореть. Температура воспламенения древесины зависит также от степени ее измельчения (соответственно, ее поверхности):

$$T_{\text{НКПВсосны}} = 255 \text{ }^{\circ}\text{C}; T_{\text{НКПВопилок}} = 230 \text{ }^{\circ}\text{C}.$$

После воспламенения температура верхнего слоя древесины повышается за счет тепла, излучаемого пламенем, и при температурах ~ 300 °С происходит максимальный выход летучих газообразных продуктов – высота факела пламени наибольшая. Верхний слой древесины превращается в уголь и температура его поверхности достигает 500...700 °С. По мере выгорания поверхностного слоя, нижележащий слой древесины прогревается до 300 °С и разлагается. Таким образом, пламенное горение древесины при образовании на ее поверхности небольшого слоя угля еще не прекращается, однако скорость выхода продуктов разложения начинает уменьшаться. В дальнейшем пламя остается только у трещин угля, и кислород может достигать поверхности угля. Толщина слоя угля к этому моменту достига-

ет 2...2,5 см и остается постоянной, так как наступает равновесие между линейной скоростью выгорания угля и скоростью прогрева и разложения древесины. Одновременное горение угля и продуктов разложения древесины продолжается до тех пор, пока вся древесина не превратится в уголь. После этого выход и горение газообразных продуктов разложения древесины прекращается, а продолжается только горение угля.

Таким образом, горение древесины состоит из двух фаз: пламенного горения летучих и горения угля. Между ними имеется переходная фаза – одновременное протекание горения в двух фазах.

В условиях пожара основную роль играет первая фаза, так как она сопровождается выделением большого объема нагретых до высокой температуры продуктов сгорания и интенсивным тепловым излучением (пламенем). Все это способствует быстрому распространению горения и увеличению площади очага пожара. Поэтому, при тушении стараются ликвидировать в первую очередь эти очаги пожара.

Горение полимерных материалов. Полимеры отличаются высоким содержанием углерода и большинство из них не содержат кислорода (каучук – изопреновый и «натуральный», полиэтилен, полипропилен). Капролактамы, полиакрилы и фенолформальдегидная смола содержат кислорода до 15...30 и более %.

Горение полимеров происходит с образованием большого количества продуктов неполного сгорания – сажи.

При нагревании полимеры ведут себя по-разному. Большинство из них при нагревании плавится и образует в процессе горения на поверхности жидкий слой. На вертикальных и наклонных поверхностях горения жидкий слой стекает, и его толщина не превышает 1...2 мм. Стекающая жидкость растекается и распространяет горение на негорящие еще предметы. На горизонтальных поверхностях горения полимеров жидкий слой непрерывно растет достигая своей постоянной величины (слой 6...8 мм).

Скорость горения органических веществ. Удельная массовая скорость выгорания твердых веществ (отношение скорости выгорания к единице поверхности) не зависит от размеров поверхности твердых веществ и изменяется в зависимости от температуры и влажности веществ (древесина $W = 10\% = 0,5 \text{ кг/см}^2 \cdot \text{мин}$; стеклопластик = 1,0; каучук СКИ-3 = $1,12 \text{ кг/см}^2 \cdot \text{мин}$).

Чем меньше влажность древесины, тем более трудно она воспламеняется, так как много тепла расходуется на ее испарение.

Приведенная массовая скорость выгорания (V_m) некоторых твердых веществ: бумага – $0,48 \text{ кг/см}^2 \cdot \text{мин}$; древесина (мебель) – $0,84 \text{ кг/см}^2 \cdot \text{мин}$; пиломатериалы в штабеле – $0,7...0,8 \text{ кг/см}^2 \cdot \text{мин}$; резиново-технические изделия – $0,67 \text{ кг/см}^2 \cdot \text{мин}$; текстолит – $0,4 \text{ кг/см}^2 \cdot \text{мин}$; хлопок разрыхленный – $0,21 \text{ кг/см}^2 \cdot \text{мин}$.

Перемещение фронта пламени по поверхности твердых веществ называется распространением горения, измеряется V , м/мин:

$$V = L/\tau,$$

где V – скорость распространения; L – расстояние, пройденное фронтом пламени, м; τ – время перемещения пламени, мин.

В расчетах принимают только скорость распространения по горизонтальной поверхности. В условиях пожара скорость распространения горения, как правило, ниже скорости распространения горения по поверхности твердого горючего вещества, так как вносят коррективы разрыва между штабелями горючих материалов.

2.3.2. Горение неорганических твердых веществ

Металлы: (Li, Na, K, Mg, Ca, Zn, Fe, Sb, Sn, Al, Ti, Zr и др.).

Сплавы: (Al–Mg, Mg–Si, Al–Si и др.).

Неметаллы: (P, Si, C, B и др.).

Неорганические соединения: сульфиды (секвисульфид Pb_4S_3 ; антимоний Sb_2S_3 ; пирит FeS_2), силициды (Mg_2Si , $CaSi$, Ca_2Si_2), фосфиды (Ca_3P_2), карбиды (SiC , CaC_2 и др.).

Особенностью их горения является то, что они при нагревании, как правило, плавятся и образуется слой паров.

Горение металлов. На поверхности металлов в процессе окисления образуются твердые оксиды, пленка которых препятствует прямому контакту с кислородом воздуха.

На способность металлов возгораться и гореть большое влияние оказывают физико-химические свойства как самих металлов, так и их оксидов. Главными из этих свойств являются температуры плавления и кипения металлов и их оксидов. По этим физическим свойствам металлы подразделяются на летучие и нелетучие.

Все летучие металлы (K, Na, Li, Mg, Ca) имеют низкую температуру плавления и при горении находятся в жидком состоянии. Температура кипения их (кроме калия) ниже температуры плавления оксидов. Поэтому на жидком металле могут находиться твердые оксиды.

При контакте металла с пламенем – он нагревается и окисляется. Дальнейший нагрев металла приводит к его испарению. Пары металла диффундируют сквозь пористый твердый оксид в воздух. При достаточной концентрации паров начинается горение, и большая часть теплоты горения передается металлу, – в результате он вновь нагревается до температуры кипения, – происходит разрыв корки оксида и более интенсивное горение.

Пары оксидов конденсируются в воздухе и превращаются в мельчайшие твердые частицы – дым. Образование белого плотного дыма является одним из признаков горения металлов.

Нелетучие металлы имеют свои особенности горения (температура плавления оксидов часто ниже температуры кипения металлов, поэтому они могут находиться на поверхности металлов в жидком состоянии) – Al, Si, Ti, Zr. Горение этих металлов происходит энергичнее в состоянии порошков, аэрозолей и стружки без образования дыма.

Титан способен образовывать твердый раствор оксида в металле, поэтому у него отсутствует четкая поверхность раздела между оксидом и металлом. Кислород воздуха имеет возможность диффундировать через оксид, в результате горение может продолжаться, если титан покрыт слоем твердого оксида. Температура горения титана около 3000 °С, т. е. ниже, чем температура кипения его оксида. В связи с этим в зоне горения оксид титана находится в жидком состоянии и образования плотного белого дыма не происходит.

2.4. Горение пылевоздушных смесей

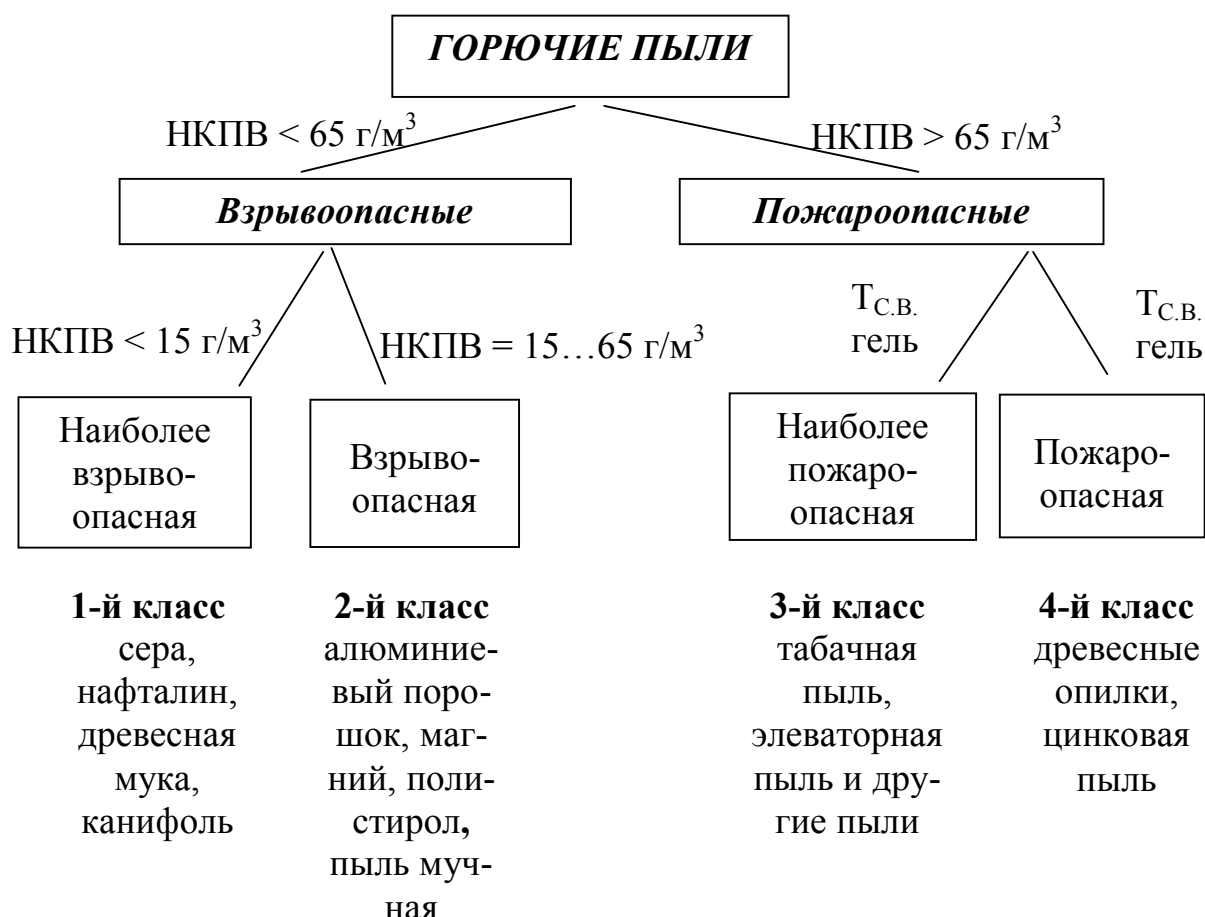
Многие технологические процессы, связанные с получением или переработкой пылевидных материалов, являются пожаро- и взрывоопасными, представляют большую опасность.

Горючая пыль – это дисперсная система, состоящая из твердых частиц размером ≤ 850 мкм, находящихся во взвешенном или осевшем состоянии в газовой среде, способная к самостоятельному горению в воздухе. Таким образом, пыль – это дисперсная система, состоящая из газообразной дисперсионной среды и твердой дисперсной фазы. Пыли по общей классификации коллоидно-дисперсных систем относятся к аэрозолям, в которых дисперсионная среда – воздух, а дисперсная фаза – твердое вещество в мелко раздробленном состоянии.

Осевшая пыль называется **аэрогелем**, пыль во взвешенном состоянии – **аэрозоль**. И те, и другие – гетерогенные системы.

Аэрогели являются пожароопасными. Их пожароопасность зависит от содержания летучих веществ в аэрогели. При горении пыли выгорают обычно только летучие вещества, а углеродистый остаток не успевает сгореть. Так, пыль кокса, графита, антрацита и некоторых других веществ не пожароопасны, так как почти не содержат летучих компонентов. Наиболее пожароопасными являются аэрогели с температурой самовоспламенения до 250 °С.

Аэрозоли являются взрывоопасными. Взрывоопасность аэрозолей, содержащих летучие вещества, характеризуется НКПВ. Наиболее взрывоопасными являются аэрозоли с величиной НКПВ < 15 г/м³.



2.4.1. Классификация пыли горючих веществ по степени пожаро- и взрывоопасности

ГОСТ 12.1.044-89 ССБТ регламентирует следующие показатели пожаро- и взрывоопасности горючих аэрозолей и аэрогелей [3]:

- для горючих пылей во взвешенном состоянии: НКПВ, $W_{\min}$, $P_{\max}$ (максимальное давление взрыва), d_p/dt (скорость нарастания давления при взрыве), МВСК (минимально взрывоопасное содержание кислорода);
- для пылей в осевшем состоянии: $t_{\text{восп.}}$, $t_{\text{св.}}$, $t_{\text{сн}}$ (самонагревание), $t_{\text{тр}}$ (температура трения), температурные условия теплового самовозгорания, $W_{\min}$, способность гореть и взрываться с водой, кислородом воздуха и другими веществами.

2.4.2. Свойства, определяющие пожаровзрывоопасность пылей

Из свойств горючих пылей наиболее важными являются: дисперсность, химическая активность, адсорбционная способность, склонность к электризации.

Дисперсность – степень измельченности частиц оценивается удельной поверхностью (суммарная площадь поверхности единицы массы пыли). С увеличением дисперсности повышается химическая активность пыли, ее адсорбционная способность, склонность к электризации, снижается $t_{\text{св}}$ и НКПВ, то есть повышается ее пожаро- и взрывоопасность.

Химическая активность – способность пыли вступать в реакции с различными веществами (в том числе реакции окисления и горения). Химическая активность пыли определяется природой вещества и в большей степени зависит от ее дисперсности (так как химические реакции протекают в основном на поверхности) скорость реакции с увеличением дисперсности возрастает. Металлы (Fe, Al, Zn), обычно негорящие при нормальных условиях, в состоянии пудры мгновенно самовозгораются при контакте с воздухом. Таким образом, пыли по пожаровзрывоопасности во много раз превосходят продукт, из которого они получены.

Адсорбционная способность – способность поверхности твердых частиц пыли поглощать пары и газы из окружающей среды. Различают **физическую** (за счет сил межмолекулярного взаимодействия – сил Ван-дер-Ваальса) и **химическую** (за счет валентных связей) адсорбцию.

Физическая и химическая адсорбция сопровождаются выделением тепла. Поэтому пыли в состоянии геля могут самонагреваться и самовозгораться.

Адсорбированные на поверхности пыли молекулы горючих газов и паров повышают устойчивость аэрозвесей, ускоряют подготовку пыли к горению. И наоборот, адсорбция негорючих газов (CO_2 , N_2) понижают склонность пыли к самовозгоранию. Это явление находит практическое применение в различных отраслях промышленности.

Склонность пыли к электризации – способность пыли приобретать заряды статического электричества. Электризация пыли происходит в результате адсорбции ионов газов из воздуха, где пыль находится во взвешенном состоянии.

Потенциал заряда пыли зависит от скорости движения пыли и ее дисперсности. Чем они выше – тем больше заряд статического электричества.

Основная опасность, создаваемая электризацией пылей, состоит в возможности искрового разряда. Разряд С.Э. возникает тогда, когда напряженность электростатического поля над поверхностью диэлектрика или проводника достигает критической (пробивной) величины. Для воздуха эта величина равна 30 кВ/м. Воспламенение горючих пылей искровыми разрядами С.Э. произойдет, если выделяющаяся энергия будет больше W_{min} энергии зажигания для данной смеси.

Эффективным способом борьбы с накоплением зарядов С.Э. является повышение влажности воздуха. Например, при относительной влажности воздуха 70% электризация пыли опасности уже не представляет (но иногда

поддерживать такую влажность трудно). Поэтому основным и достаточно эффективным мероприятием безопасности в этих случаях является надежное заземление подвижных и неподвижных частей оборудования.

2.4.3. Взрывы пылевоздушных смесей

К наиболее взрывоопасным относятся пыли, имеющие размеры частиц в пределах 70...100 мкм с величиной НКПВ менее 15 г/м³. Практически все органические, а также неорганические, в том числе металлические пыли, сгорают в воздухе и могут привести к катастрофическим взрывам в замкнутых объемах.

Типичная последовательность событий при взрыве пылей такова. Вначале происходит небольшой взрыв в какой-либо части оборудования (трубопроводе, аппарате). Затем образовавшиеся продукты взрыва и вибрация оборудования поднимают в воздух осевшую на загрязненном рабочем месте пыль. Эта пыль уже является горючим для второго разрушительного взрыва.

Другая типичная ситуация на шахтах: сначала происходит взрыв метано-воздушной смеси, в результате которого поднимается большое количество угольной пыли, затем происходит второй взрыв – угольной пыли, который приводит к катастрофическим последствиям.

Важнейшей характеристикой взрывоопасности пыли является НКПВ (НКПР). На величину НКПР влияют дисперсность, влажность, температура, давление и другие факторы. Минимальный НКПР при дисперсности 70...100 мкм, влажности до 15%. Повышение температуры ведет к понижению НКПВ. Снижение давления вызывает снижение НКПВ (до 1,5...2,0 кПа).

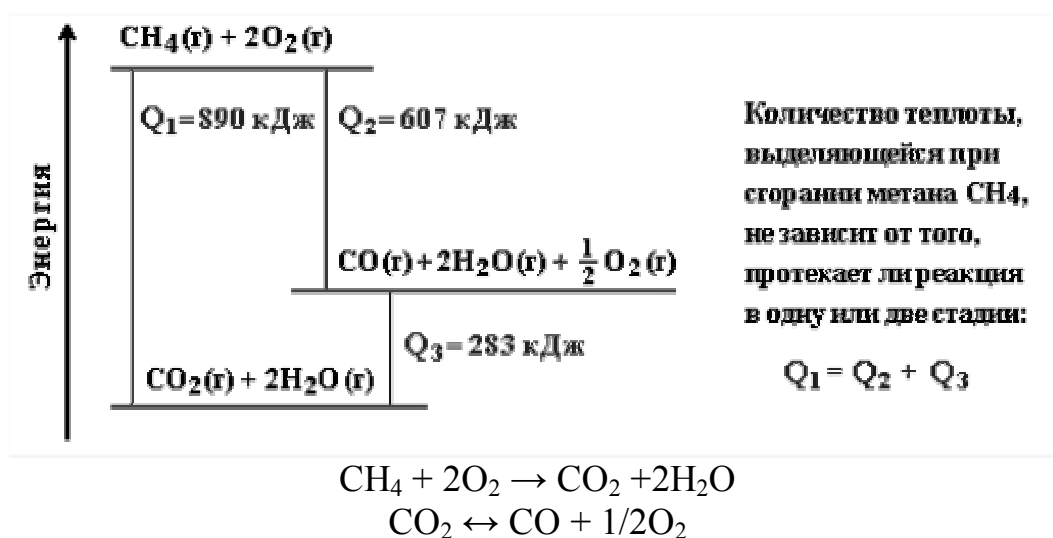
2.5. Термодинамика процессов горения

В общем случае, термодинамика – раздел физики, изучающий наиболее общие свойства макроскопических систем, находящихся в состоянии термодинамическом равновесия. Термодинамика строится на основе фундаментальных принципов, начал термодинамики, которые являются обобщением многочисленных наблюдений и результатов экспериментов. Различают химическую термодинамику, техническую и термодинамику различных физических явлений.

Химическая термодинамика – раздел физической химии, использующий законы термодинамики для изучения химических и физико-химических процессов. Термодинамические данные широко применяются для определения выходов продуктов химических реакций и других параметров технологических процессов в химической, металлургической и других отраслях промышленности.

Тепловые эффекты реакций горения. Огромное число химических реакций используется для получения энергии. К ним относятся, например, реакции сгорания различных топлив, для оценки которых требуется знать количество выделяемой тепловой энергии (тепловых эффектов).

Тепловые эффекты реакций определяют как экспериментально, так и с помощью термохимических расчетов, основанных на законе Гесса. Тепловой эффект реакции зависит только от начального и конечного состояний реагирующих веществ и не зависит от пути реакции (т.е. от числа стадий и промежуточных состояний). Это можно показать на примере реакции горения метана:



Теплота сгорания. *Теплота сгорания* – это количество выделившейся теплоты при полном сгорании массовой (для твердых и жидких веществ) или объемной (для газообразных) единицы вещества. Измеряется в джоулях или калориях. Теплота сгорания, отнесенная к единице массы или объема топлива, называется *удельной теплотой сгорания* (Дж или кал на 1 кг, м³ или моль).

Для ее измерения пользуются методами калориметрии. Теплота сгорания определяется химическим составом горючего вещества. Содержащиеся в горючем веществе химические элементы обозначаются принятыми символами С, Н, О, N, S, а зола и вода – символами А и W соответственно.

Теплота сгорания может быть отнесена к рабочей массе горючего вещества Q^P , то есть к горючему веществу в том виде, в каком оно поступает к потребителю; к сухой массе вещества Q^C ; к горючей массе вещества Q^G , то есть к горючему веществу, не содержащему влаги и золы. Различают высшую (Q_B) и низшую (Q_H) теплоту сгорания.

Теплота сгорания является наиболее важной характеристикой топлива, так как определяет количество тепла, получаемого при сжигании 1 кг твердого или жидкого топлива или 1 м³ газообразного топлива в кДж/кг (ккал/кг). 1 ккал = 4,1868 или 4,19 кДж.

Под **высшей теплотой сгорания** понимают то количество теплоты, которое выделяется при полном сгорании вещества, включая теплоту конденсации водяных паров при охлаждении продуктов сгорания.

Низшая теплота сгорания соответствует тому количеству теплоты, которое выделяется при полном сгорании, без учета теплоты конденсации водяного пара. Теплоту конденсации водяных паров также называют **скрытой теплотой сгорания**.

Низшая и высшая теплота сгорания связаны соотношением

$$Q_B = Q_H + k(W + 9H),$$

где k – коэффициент, равный 25 кДж/кг (6 ккал/кг); W – количество воды в горючем веществе, % (по массе); H – количество водорода в горючем веществе, % (по массе).

Низшая теплота сгорания определяется по формулам (кДж/кг или ккал/кг):

$$Q_H^P = Q_B^P - 2514 \cdot ((9H^P + W^P)/100) \text{ (для твердого вещества)}$$

или

$$Q_H^P = Q_B^P - 600 \cdot ((9H^P + W^P)/100) \text{ (для жидкого вещества),}$$

где 2514 – теплота парообразования при температуре 0 °С и атмосферном давлении, кДж/кг; H^P и W^P – содержание водорода и водяных паров в рабочем топливе, %; 9 – коэффициент, показывающий, что при сгорании 1 кг водорода в соединении с кислородом образуется 9 кг воды.

Низшая теплота сгорания определяется экспериментально для каждого вещества и является справочной величиной. Также ее можно определить для твердых и жидких материалов, при известном элементарном составе, расчетным способом в соответствии с формулой Д.И. Менделеева, кДж/кг или ккал/кг:

$$Q_H^P = 339 \cdot C^P + 1256 \cdot H^P - 109 \cdot (O^P + S_L^P) - 25,14 \cdot (9 \cdot H^P + W^P)$$

или

$$Q_H^P = 81 \cdot C^P + 246 \cdot H^P - 26 \cdot (O^P + S_L^P) - 6 \cdot W^P,$$

где C_P , H_P , O_P , S_L^P , W_P – содержание в рабочей массе топлива углерода, водорода, кислорода, летучей серы и влаги в % (по массе).

Для сравнительных расчетов используется так называемое Топливо условное, имеющее удельную теплоту сгорания, равную 29 308 кДж/кг (7000 ккал/кг). В России тепловые расчеты (например, расчет тепловой нагрузки для определения категории помещения по взрывопожарной и пожарной опасности) обычно ведут по низшей теплоте сгорания (табл. 2.1), в США, Великобритании, Франции – по высшей.

Таблица 2.1

Низшая теплота сгорания топлива

Вещества и материалы	Низшая теплота сгорания Q_H^P , МДж/кг
Бензин	41,87
Керосин	43,54
Бумага (в стопках)	13,4
Древесина (бруски $W = 14\%$)	13,8
Каучук натуральный	44,73
Линолеум поливинилхлоридный	14,31
Резина	33,52
Волокно штапельное	13,8
Полиэтилен	47,14
Пенополистирол	41,6
Хлопок разрыхленный	15,7

Температура горения. Определение температуры горения горючих веществ (ГВ) имеет большое значение, так как это дает новый критерий оценки существующих горючих составов и облегчает создание новых, более совершенных рецептов.

Температуру горения можно определить двумя способами:

- 1) вычислением по формуле, основанной на том известном положении, что температура реакции равна ее теплоте, деленной на суммарную теплоемкость продуктов реакции;
- 2) непосредственным измерением (при помощи термометров, термопар или оптических пирометров).

Определение температуры горения ГВ (горючих веществ) расчетным путем затрудняется отсутствием точных цифровых данных о теплоемкостях многих соединений при высоких температурах (особенно при температурах выше $2000\text{ }^{\circ}\text{C}$); для многих соединений не определены до настоящего времени или определены с недостаточной точностью и скрытые теплоты плавления и испарения. Вычисляемые таким путем значения температуры реакции горения являются только верхним (практически недостижимым) пределом, так как в действительности температура горения должна быть значительно ниже вследствие тепловых потерь в окружающее пространство (вследствие теплопроводности, конвекции и излучения пламени), а также вследствие затраты теплоты на термическую диссоциацию продуктов горения. Учитывая, что часто сгорание ГВ происходит в открытом пространстве, где имеется полная возможность для расширения газообразных продуктов реакции, а также, что процесс горения (в отличие от взрыва ВВ) протекает со сравнительно малой скоростью, следует признать более целесообразным пользование при расчетах величинами теплоемко-

сти при постоянном давлении. Молекулярные теплоемкости газов при постоянном объеме и при постоянном давлении связаны соотношением:

$$C_p = C_v + R,$$

где R – газовая постоянная, равная $1,937$ кал/г-моль · °С. Согласно кинетической теории газов энергия грамм-молекулы газа равна:

$$E = i \cdot R \cdot T / 2,$$

где i – число степеней свободы различных видов движения молекул. Для одноатомных газов это число равно 3, для двухатомных – 5, а для многоатомных – 6. Молекулярную теплоемкость газа C_v можно вычислить по формуле

$$C_v = iR/2$$

Получаем значения C_v в кал/г-моль · °С:

для одноатомных газов	2,97
для двухатомных газов	4,95
для многоатомных газов	5,94

Молекулярная теплоемкость газов при постоянном давлении C_p (кал/г-моль · °С) равна:

для одноатомных газов	4,95
для двухатомных газов	6,93
для многоатомных газов	7,92

Экспериментальные данные не всегда подтверждают такой теоретический расчет для двухатомных и в особенности многоатомных газов. Для простых веществ, находящихся при высоких температурах (1000 °С и выше) в твердом состоянии, можно считать согласно правилу Дюлонга и Пти, что их грамм-атомная теплоемкость есть величина постоянная и равная приблизительно $6,4$ кал/°С. Для соединений, находящихся в твердом состоянии при высоких температурах, в известной мере справедливо выведенное экспериментальным путем правило Нейманна-Коппа, согласно которому теплоемкость сложного твердого соединения равняется сумме атомных теплоемкостей составляющих его элементов. Так же как и для газов, здесь следует различать C_p и C_v , но разница между ними для твердых тел очень невелика и ею практически можно пренебречь. Относительно теплоемкости жидких тел при высоких температурах (выше 1000 °С) указать какие-нибудь определенные закономерности затруднительно. Следует только отметить, что теплоемкость вещества в жидком состоянии обычно больше его теплоемкости в твердом состоянии. При отсутствии экспериментальных данных теплоемкость жидкости в расчетах принимают, допуская при этом безусловно некоторую погрешность равной теплоемкости того же вещества в твердом состоянии.

Экспериментальное определение температуры реакции горения. Температуру горения некоторых медленно горящих ГВ можно определить со сравнительно небольшой погрешностью обычным ртутным термометром. В тех случаях, когда температура горения лежит в пределах 360–600 °С, можно воспользоваться кварцевыми ртутными термометрами, в которых ртуть находится под давлением. Необходимым условием получения при этих опытах значений температуры реакции, близких к истинной, является малая скорость горения составов, чтобы шарик ртутного термометра успевал достаточно прогреться. Для измерения температуры до 800–900 °С можно применять железо-константановые термопары; термопара хромель-алюмель может служить для измерения температуры до 1300 °С.

Для измерения более высоких температур до 1600 °С можно воспользоваться термопарой, один проводник которой сделан из платины, а другой из сплава платины с 10–15% родия (температура плавления платины 1771 °С). Для измерения температур в пределах 1600–2000 °С можно пользоваться термопарой, один проводник которой состоит из иридия, а другой из сплава иридия с рутением (температура плавления иридия 2350 °С, рутения 1950 °С).

В теплотехнике различаются следующие температуры горения газов: жаропроизводительность, калориметрическую, теоретическую и действительную (расчетную).

Жаропроизводительность $t_{ж}$ – максимальная температура продуктов полного сгорания газа в адиабатических условиях с коэффициентом избытка воздуха $\alpha = 1,0$ и при температуре газа и воздуха, равной 0 °С:

$$t_{ж} = Q_n / (\sum V_{cp})$$

где Q_n – низшая теплота сгорания газа, кДж/м³; $\sum V_{cp}$ – сумма произведений объемов диоксида углерода, водяного пара и азота, образовавшихся при сгорании 1 м³ газа (м³/м³), и их средних объемных теплоемкостей при постоянном давлении в пределах температур от 0 °С до $t_{ж}$ (кДж/(м³ · °С)).

Калориметрическая температура горения (t_K) – температура, определяемая без учета диссоциации водяных паров и диоксида углерода, но с учетом фактической начальной температуры газа и воздуха. Она отличается от жаропроизводительности $t_{ж}$ тем, что температура газа и воздуха, а также коэффициент избытка воздуха α принимаются по их действительным значениям. Определить t_K можно по формуле

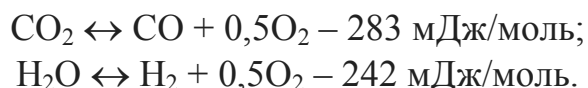
$$t_K = (Q_n + q_{физ}) / (\sum V_{cp}),$$

где $q_{физ}$ – теплосодержание (физическая теплота) газа и воздуха, отсчитываемое от 0 °С, кДж/м³.

Природные и сжиженные углеводородные газы перед сжиганием обычно не нагревают, и их объем по сравнению с объемом воздуха, идущего на горение, невелик. Поэтому при определении калориметрической темпера-

туры теплосодержание газов можно не учитывать. При сжигании газов с низкой теплотой сгорания (генераторные, доменные и др.) их теплосодержание (в особенности нагретых до сжигания) оказывает весьма существенное влияние на калориметрическую температуру.

Теоретическая температура горения (t_T) – максимальная температура, определяемая аналогично калориметрической t_K , но с поправкой на эндотермические (требующие теплоты) реакции диссоциации диоксида углерода и водяного пара, идущие с увеличением объема:



При высоких температурах диссоциация может привести к образованию атомарного водорода, кислорода и гидроксильных групп ОН. Кроме того, при сжигании газа всегда образуется некоторое количество оксида азота. Все эти реакции эндотермические и приводят к снижению температуры горения.

Теоретическая температура горения может быть определена по следующей формуле:

$$t_T = (Q_H + q_{\text{физ}} - q_{\text{дис}})/(\Sigma V_{\text{ср}}),$$

где $q_{\text{дис}}$ – суммарные затраты теплоты на диссоциацию CO_2 и H_2O в продуктах сгорания, кДж/м³; $\Sigma V_{\text{ср}}$ – сумма произведения объема и средней теплостойкости продуктов сгорания с учетом диссоциации на 1 м³ газа.

Действительная (расчетная) температура продуктов сгорания (t_d) – температура, которая достигается в реальных условиях в самой горячей точке факела. Она ниже теоретической и зависит от потерь теплоты в окружающую среду, степени отдачи теплоты из зоны горения излучением, растянутости процесса горения во времени и др. Действительные усредненные температуры определяются по тепловому балансу или приближенно по теоретической или калориметрической температуре горения в зависимости от температуры в зоне горения с введением в них экспериментально установленных поправочных коэффициентов:

$$t_d = t_T \cdot \eta,$$

где η – пирометрический коэффициент.

В практике надо знать не только приведенные выше адиабатные температуры горения, но и максимальные температуры, возникающие в пламени. Их приближенные значения обычно устанавливают экспериментальными методами спектрографии. Анализ приведенных данных показывает, что максимальные температуры в пламени меньше жаропродуктивности (за счет затрат тепла на диссоциацию H_2O и CO_2 и отвода теплоты из пламенной зоны).

3. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ВЗРЫВЕ

Взрыв – внезапное изменение физического или химического состояния вещества, сопровождающееся крайне быстрым превращением (выделением) энергии.

Толковый словарь дает следующее определение взрыва: явление, сопровождающееся:

- 1) резким грохотом;
- 2) быстрой химической или ядерной реакцией с выделением тепла и стремительным расширением газов;
- 3) разрушающим действием за счет повышенного давления в области взрыва.

Быстрое выделение энергии, как правило, приводит к разогреву, движению и сжатию продуктов взрыва и окружающей среды, возникновению интенсивного скачка давления, разрушению и разбрасыванию. В окружающей среде образуется и распространяется особого рода возмущение – ударная волна. Полное количество выделившейся при взрыве энергии определяет масштаб явления, объемы и площади, охваченные разрушением. Концентрация энергии (энергии в единице объема) определяет интенсивность разрушений в очаге взрыва.

При взрыве исходная потенциальная энергия, как правило, вначале превращается в энергию нагретых сжатых газов, которая, в свою очередь, при расширении газов переходит в энергию движения, сжатия, разогрева среды. Часть энергии остается в виде внутренней (тепловой) энергии расширившихся газов [9–11].

3.1. Взрыв и его разновидности

Основные виды исходной энергии взрыва:

- 1) **химическая энергия**;
- 2) **атомная энергия** (ядерная энергия) – удельная энергия (энергия на единицу веса) при ядерных взрывах в 10^7 – 10^8 раз выше удельной химической энергии;
- 3) **электрическая энергия** – взрыв может возникнуть при искровом разряде или быстром разряде через тонкую проволоку; молния является примером подобного рода взрыва в природе;
- 4) **кинетическая энергия** движущихся тел – при соударениях тел, движущихся с большими скоростями, может внезапно выделиться тепловая энергия, достаточная для превращения части вещества в нагретый сжатый газ, что приводит к взрыву. Подобного рода взрывы возникают при падении крупных метеоритов;
- 5) **энергия сжатых газов** – взрывы баллонов со сжатыми газами, паровых котлов – примерами являются вулканические взрывы;

б) внезапный переход *потенциальной энергии упругих деформаций* в энергию движения среды представляет собой своеобразный взрыв, протекающий без какого-либо участия сжатых газов. Большинство землетрясений являются взрывами такого типа.

Наиболее изученными и имеющими важнейшее практическое значение являются взрывы, связанные с внезапным выделением химической энергии, возникающие при весьма быстром химическом превращении с выделением теплоты и образованием нагретых сжатых газов.

Возникновение взрыва. В химических системах взрыв может возникнуть цепным или тепловым путем, от удара и трения, от взрыва другого заряда (в частности, от капсюля-детонатора). Сущность теплового взрыва вскрыта акад. Н.Н. Семеновым и заключается в том, что при определенных условиях в веществе нарушается тепловое равновесие: приход тепла реакции становится больше теплоотдачи. В результате в системе начинается лавинообразное нарастание скорости реакции и температуры вплоть до появления пламени и возникновения взрыва. Возникновение взрыва при ударе связано с появлением местных микроскопических разогревов, приводящих к развитию микроочагов горения. В химических системах взрыв обычно возникает в некоторой части системы и затем распространяется на всю систему. При поджигании взрывчатого вещества сначала возникает медленное горение взрывчатого вещества. На открытом воздухе процесс может полностью пройти в виде медленного горения, без развития местного повышения давления, без развития взрыва. Если же горение происходит в условиях замкнутого или полужамкнутого объема, то возникшее повышение давления может привести к существенному ускорению горения и развитию взрыва. Кроме повышения давления, являющегося основным фактором перехода горения во взрыв, существенным также является предварительный разогрев горячей системы. При сильном ударе по взрывчатому веществу одновременно возникают очаги разогрева и весьма высокое давление, что способствует возникновению взрыва. Если местное повышение давления станет большим, то образуется ударная волна, способная передавать разложение от слоя к слою, возникает детонация – явление распространения по взрывчатому веществу экзотермической химической реакции, возбуждаемой ударной волной. Скорость распространения детонационной волны (скорость детонации) составляет несколько тысяч метров в секунду.

Режимы взрывчатых превращений. Все многообразие взрывчатых веществ и составов на их основе представляет собой необычайно широкий ряд энергетических материалов (ЭМ). В отечественной литературе также широко используется термин взрывчатые вещества – (ВВ) и взрывчатые материалы (ВМ). ЭМ – химические соединения, находящиеся в нормальных условиях в одном из известных агрегатных состояний: твердом, жидком или газообразном (рис. 3.1).

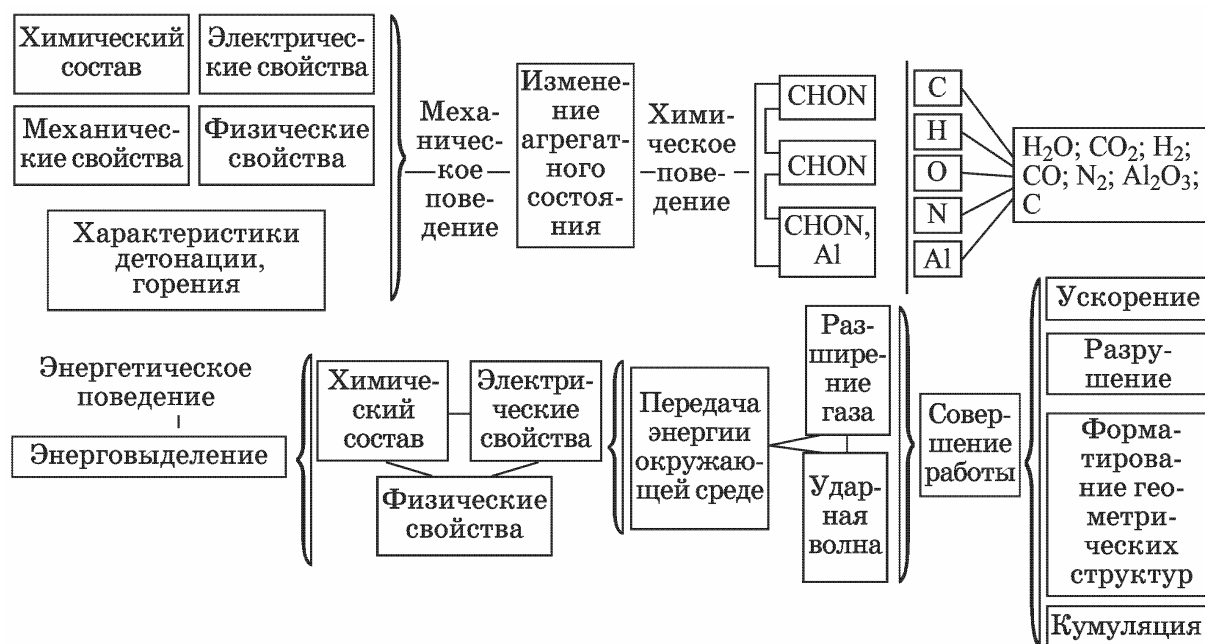


Рис. 3.1. Поведение взрывчатых материалов

Для ЭМ режим энерговыведения определяет энергетическое поведение системы, что сопровождается обязательным изменением агрегатного состояния системы. Особенностью изменения агрегатного состояния системы является то, что вещество из твердого, жидкого или газообразного состояния переходит обязательно в газообразное состояние. В ряде случаев не исключено присутствие конденсированной фазы, парообразных или даже твердых составляющих.

Газообразное вещество, в зависимости от режима энерговыведения и динамики фазового перехода, называют продуктами горения (ПГ), продуктами детонации (ПД) или продуктами взрыва (ПВ), когда не определен в основных чертах режим взрывчатого превращения (ВП).

Переход от исходного состояния к конечному – процесс, сложный, многоступенчатый по отношению к метастабильным состояниям, которые проходит система. Указанный переход от исходного, начального состояния к конечному и составляет существо режимов ВП.

Внешнее воздействие, приводящее к выделению потенциальной энергии, называют иницированием.

Режим взрывчатых превращений (РВП) – подразумевает совокупность взаимосвязанных, физически обусловленных процессов, целенаправленно реализуемых в энергетическом материале.

Общим для всех режимов в конденсированных системах являются выделение энергии и фазовый переход. Однако механизм перехода, определяющие факторы, пространственно-временная газодинамическая картина течения, существенно отличаются. Выделяют следующие режимы ВП:

– нормальное послойное горение (НГ) – горение, распространяющееся с постоянной скоростью с неизменным профилем температуры и концентрации;

– конвективное горение (КГ) – разновидность горения твердых энергетических материалов, обладающих газодинамической пористостью. Процесс ведется струями сгоревшего вещества. Конвективное горение возникает при достижении давления срыва нормального горения, $p_{кр}$;

– частный случай преддетонационного волнового процесса (ПВП) – низкоскоростная детонация (НСД), волновой процесс с малой долей разложения непосредственно за фронтом волны сжатия;

– нормальная детонация (НД) – сверхзвуковой стационарный комплекс, состоящий из ударной волны и химической реакции за ней (рис. 3.2).

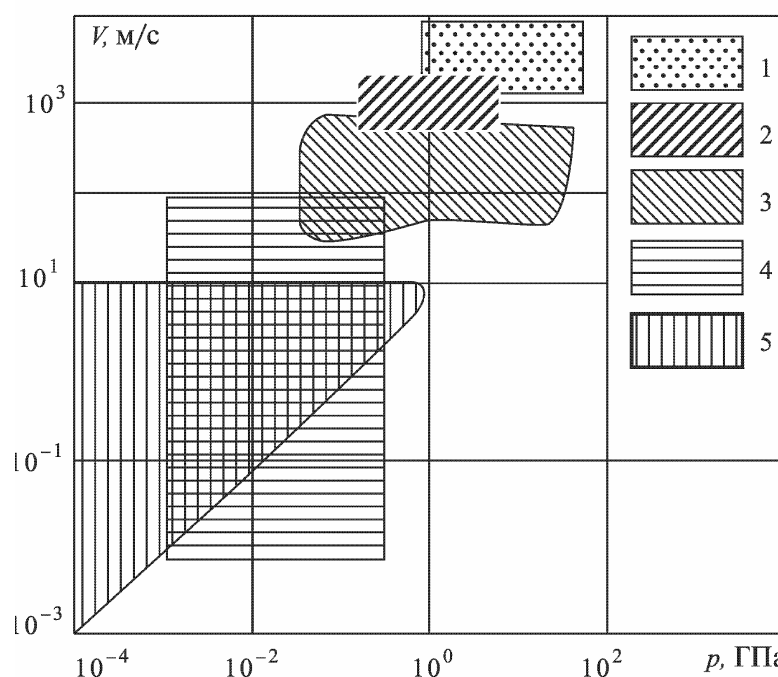


Рис. 3.2. Ориентировочные диапазоны существования режимов: 1 – детонация; 2 – НСД; 3 – детонационно-подобный взрыв; 4 – конвективное горение; 5 – послойное (нормальное) горение; p – давление; V – скорость фронта

Режимы ВП отличаются передачей энергии в направлении распространения и механизмом инициирования химической реакции во фронте процесса. Практическую ценность в большей степени представляют два процесса, послойное горение (нормальное горение) и нормальная детонация (стационарная детонация).

Наиболее естественно реализуются стационарные режимы НГ и НД. Для КГ и НСД необходимы специальные условия, диапазон которых относительно узок.

В порядке возрастания мощности и уровня параметров, режимы располагаются в следующем порядке: НГ-КГ-НСД-НД. Указанная последовательность обладает рядом особенностей:

- при определенных условиях один режим может переходить в другой в поступательном направлении от процесса с низкоскоростными параметрами к высокопараметрическому;
- возможно возбуждение любого из перечисленных режимов, который может переходить в последующий;
- обратный переход НД-НСД-КГ-НГ исключается;
- чем выше порядок процесса, тем выше параметры процесса ВП: давление, скорость, тем короче время его протекания.

Нормальное горение – механизм передачи энергии и распространения процесса определяется молекулярной теплопроводностью, волновые эффекты полностью отсутствуют, внешние условия позволяют надежно управлять процессом.

Конвективное горение – процесс ведется фильтрацией горячих ПГ из зоны горения вглубь нереагирующего вещества, роль волновых процессов существенна лишь в зоне горения, роль внешних условий в управлении параметрами режима ограничена.

Низкоскоростная детонация возбуждается и поддерживается слабыми волнами сжатия, генерирующими реакцию в локальных областях (очагах), физико-механическая структура заряда является определяющим фактором, наличие оболочки способствует, а в ряде случаев и определяет возможность распространения процесса.

Нормальная детонация ведется совместным энерговыделением за счет локального и гомогенного разогрева за фронтом сильной ударной волны.

Взрыв взрывчатых веществ (ВВ) – это быстрое химическое превращение вещества, протекающее с выделением большого количества тепла и образованием газов.

Для того чтобы протекать в форме взрыва, химическая реакция должна удовлетворять четырем основным условиям:

- 1) экзотермичность;
- 2) образование газов;
- 3) большая скорость;
- 4) способность к самораспространению.

Все эти условия не являются абсолютными и независимыми друг от друга. Так, большая скорость реакции определяется не только величиной константы скорости, но и температурой, достигнутой при реакции. Точно также способность реакции к самораспространению в значительной мере зависит от скорости ее протекания и теплового эффекта. Отсутствие или наличие газов в продуктах реакции также в известной степени обусловлено тепловым эффектом.

Четыре условия в своем сочетании определяют не только возможность самораспространения химической реакции в форме взрыва, но и механическое действие последнего.

Экзотермичность превращения ВВ в продукты взрыва может иметь разные причины и определяется тем, что прочность связей между атомами в продуктах превращения значительно больше, чем в самом ВВ. Следовательно, способность к экзотермической реакции зависит от химической структуры вещества. По Вант-Гоффу химическая инертность углеродной связи делает возможным существование термодинамически неустойчивых соединений, образование которых из элементов связано со значительной затратой энергии, поэтому эти соединения способны распадаться с выделением тепла.

Главное практическое значение в современной взрывной технике имеют органические вещества, содержащие NO_2 , – группу, связанную с углеродом непосредственно (нитросоединения), через азот (нитроамины) и через кислород (нитроэфиры). Основная часть теплового эффекта при взрыве таких соединений получается за счет окисления углерода и водорода, содержащихся в их молекулах, кислородом нитрогруппы (табл. 3.1).

Таблица 3.1

Атомные группировки, сообщающие соединению взрывчатость

O – O	N = N	C $\equiv$ C	O – Cl
H – Sb	H – As	O – N	
N – Cl	N – S	N – Se	
C – S	C – N	C – Ag	

Скорость реакции и способность ее к самораспространению. Характерной особенностью ВВ является способность вызванной в них локальной химической реакции в известных условиях к неограниченному самораспространению в результате тепловой волны, передаваемой тем или иным путем (теплопроводностью, ударной волной и т. д.). Тепловая волна, в свою очередь, поддерживается химической реакцией, которую она вызывает.

Существенным фактором, определяющим возможность возникновения и распространения самоподдерживающейся тепловой волны, является ее интенсивность, определяемая тепловым эффектом реакции и скоростью превращения ВВ при данной температуре. Наряду с экзотермичностью определенную роль играет также реакционная способность молекулы, характеризующая энергией активации. Определенную роль во взрывных явлениях играет соотношение между теплотой реакции и энергией активации.

Таким образом, взрывчатость может быть достигнута как за счет большой экзотермичности реакции, так и за счет малой устойчивости молекулы. Обычно стремятся использовать насколько возможно первый фактор потому, что величина теплового эффекта реакции определяет и действие взрыва, а также потому, что малая устойчивость молекулы увеличивает опасность производства и применения ВВ.

Образование газов. Скорость передачи энергии от слоя к слою в ВВ путем распространения скачка давления (ударной волной) несравненно больше скорости теплопередачи. Соответственно быстрее распространяется и химическая реакция (так называемая детонация взрывчатого вещества). Необходимым условием такого режима распространения реакции является наличие среди ее продуктов газов. В этом и заключается значение образования газов как условия возможности детонационного самораспространения химической реакции.

Роль газообразных продуктов взрыва первостепенна. Образующиеся газообразные продукты разложения в момент образования являются энергоносителем. С точки зрения совершения работы, газообразные продукты являются лучшим из реально существующих рабочих тел. И независимо от того, каким способом передается энергия окружающей среде: за счет ударной волны, за счет плавно меняющегося давления при расширении горячих газов, или за счет того и другого вместе, они позволяют передать значительную часть потенциальной химической энергии системы окружающей среде.

Механизм передачи энергии окружающей среде предопределен режимом взрывчатого превращения. Режимы, имеющие волновую природу, передают энергию среде волновым образом, а режимы с кондуктивной или конвективной природой создают на границе давление, меняющееся во времени, при этом не исключено, что в окружающей среде будут формироваться и ударные волны.

Интенсивные методы передачи энергии характерны для волновых режимов и, в первую очередь, для детонации.

Экзотермичность реакции, образование газов, скорость химического превращения и способность его к самораспространению являются также факторами, которые определяют разрушающее действие взрыва. Так, образующиеся при взрыве сильно сжатые газы высокого давления производят внешнюю работу, которая совершается за счет энергии, выделяющейся при реакции.

Большая скорость реакции обеспечивает ту огромную мощность, которая является характерным признаком взрыва. Так, уголь горит на воздухе без всякого взрыва, угольная пыль (взвесь) – взрывается.

Способность химического превращения к самостоятельному распространению является также важнейшей характеристикой ВВ с точки зрения реальной возможности его технического применения.

3.2. Классификация взрывных явлений

В табл. 3.2 приведена классификация взрывов, которая содержит перечень источников взрыва, включая природные, преднамеренные и случайные взрывы [9]. Перечень составлен с учетом различных способов энерговыделения и представляется достаточно полным, включен и перечень теоретических моделей, описывающих источники, используемые для изучения взрывов. В разных столбцах таблицы приведены независимые данные.

Таблица 3.2

Классификация взрывов

Теоретические модели	Природные взрывы	Преднамеренные взрывы	Случайные взрывы
Идеальный точечный источник: – в идеальном газе; – в реальном газе Автомодельный источник (источник с бесконечно большим энерговыделением) Сфера с мгновенным энерговыделением (взрывающаяся сфера) Сфера с плавным энерговыделением Поршень: – с постоянной скоростью; – ускоряющийся; – с конечным ходом Волна энерговыделения: – при горении с постоянной скоростью;	Молнии Вулканы Метеориты	Ядерные взрывы Взрывы конденсированных ВВ: – промышленных ВВ; – военных ВВ; – пиротехнических ВВ Взрывы топливно-воздушных облаков Ружейные и пушечные взрывы: – у дульного среза; – у сброса безоткатного орудия Электрические искры Взрывающиеся проволоочки Лазерные искры	Взрывы конденсированных ВВ: – в непрочной оболочке или без нее; – в прочной оболочке Взрывы при горении в замкнутом объеме без избыточного давления газов и паров пылевзвесей Взрывы емкостей с газом под давлением: – при простых авариях; – при горении; – с последующим горением; – при выходе из-под контроля химической реакции; – при выходе из-под контроля ядерного реактора

Теоретические модели	Природные взрывы	Преднамеренные взрывы	Случайные взрывы
– при детонации – при ускоряющихся пламенах; – при пламенах, рас- пространяющихся к центру источника		Взрывы в замкну- тых объемах, на- пример, исследо- вательские взрывы газов и пылевзве- сей, а также взры- вы в цилиндрах двигателей внут- реннего сгорания	BLEVE (взрывы емко- стей с перегретой жид- костью): – при внешнем нагреве; – с горением после ава- рии; – без горения после ава- рии; – при выходе из-под контроля химической реакции Взрывы неограничен- ного облака паров Физические взрывы

Из всего разнообразия взрывов наиболее распространенными и изученными являются взрывы за счет потенциальной химической энергии, которая превращается в энергию сжатых газов в результате быстрого протекания химической реакции.

3.3. Характеристика аварийных взрывов

В химических и нефтехимических производствах используется и перерабатывается большое количество горючих и взрывоопасных материалов. Поэтому высока потенциальная опасность взрывов большой разрушительной силы, приводящих к травмам обслуживающего персонала, наносящих значительный материальный ущерб народному хозяйству.

Анализ крупных аварий показывает, что при взрывах больших объемов парогазовых выбросов разрушению подвергаются не только здания и сооружения самих промышленных предприятий, но и близлежащих жилых массивов.

Как показывает анализ аварий, отдельные производства, характеризующиеся большой потенциальной опасностью, недостаточно снабжены средствами, предупреждающими залповый выброс горючих продуктов в атмосферу и взрывы в закрытых системах. С другой стороны, ряд производств со сравнительно невысокой потенциальной опасностью необоснованно оснащен ненужными и дорогостоящими средствами противоаварийной защиты.

Изучение характерных опасностей типовых химико-технологических процессов дает возможность еще на стадии исследовательских и проектных работ выбрать наиболее рациональное аппаратное оформление и соответствующей надежности и класса точности КИП, средства автоматизации и противоаварийной защиты в зависимости от физико-химических свойств веществ и характера процесса.

Важнейшим обособленным направлением повышения взрывозащиты химико-технологических процессов во всех случаях является устранение внешних постоянных и случайных источников воспламенения выбрасываемых в атмосферу горючих и взрывоопасных веществ.

Из опубликованного ВНИИТБХП анализа аварий следует, что основное их количество (81 %) связано с ведением химико-технологических процессов, 13 % с подготовкой оборудования к ремонту, ремонтными работами или приемом оборудования из ремонта и 6 % – по другим причинам.

Аварии катастрофических размеров, сопровождающиеся разрушением зданий и сооружений предприятий и прилегающих жилых районов отмечены в крупнотоннажных производствах аммиачной селитры, капролактама, полиэтилена, синтеза спирта, хлор-пренового каучука и др.

Анализ аварий в химической и нефтехимической промышленности в сочетании с математической обработкой статистических данных позволил выделить наиболее характерные опасности химических производств:

- образование взрывоопасного облака парогазовоздушных смесей над территорией предприятия и близлежащих жилых районов, а также в объеме помещений производственных зданий;
- образование взрывоопасных парогазовых смесей в аппаратуре и иницировании их внутренними источниками воспламенения в аппаратуре и трубопроводах;
- образование жидких или твердых взрывоопасных продуктов и накопление их в аппаратуре, а также иницирование взрыва внутренними источниками воспламенения;
- образование взрывоопасных пылевоздушных смесей в производственных помещениях и в аппаратуре и иницирование взрыва внутренними и внешними источниками воспламенения;
- проявление внешних источников воспламенения, иницирование взрыва парогазовых и жидкостных технологических выбросов.

4. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВАХ (ВВ)

ВВ как высококонцентрированный и экономичный источник энергии широко применяют в различных отраслях народного хозяйства и военных целях.

Около 90 % всего объема руд черных и цветных металлов в России добывается взрывным способом. Массовые взрывы широко используются при вскрытии рудничных тел и угольных пластов, месторождений других полезных ископаемых, в строительстве при сооружении плотин и насыпей, прокладке автомобильных и ж/д магистралей, водных каналов, нефте- и газопроводов, тоннелей, особенно в труднодоступных местах.

ВВ также широко применяются при взрывных способах обработки металлов в машиностроении и металлургии, штамповке, сварке, упрочнении деталей машин, резке металлов, при сейсморазведке, перфорации нефтяных скважин, при тушении лесных пожаров и для других технических нужд.

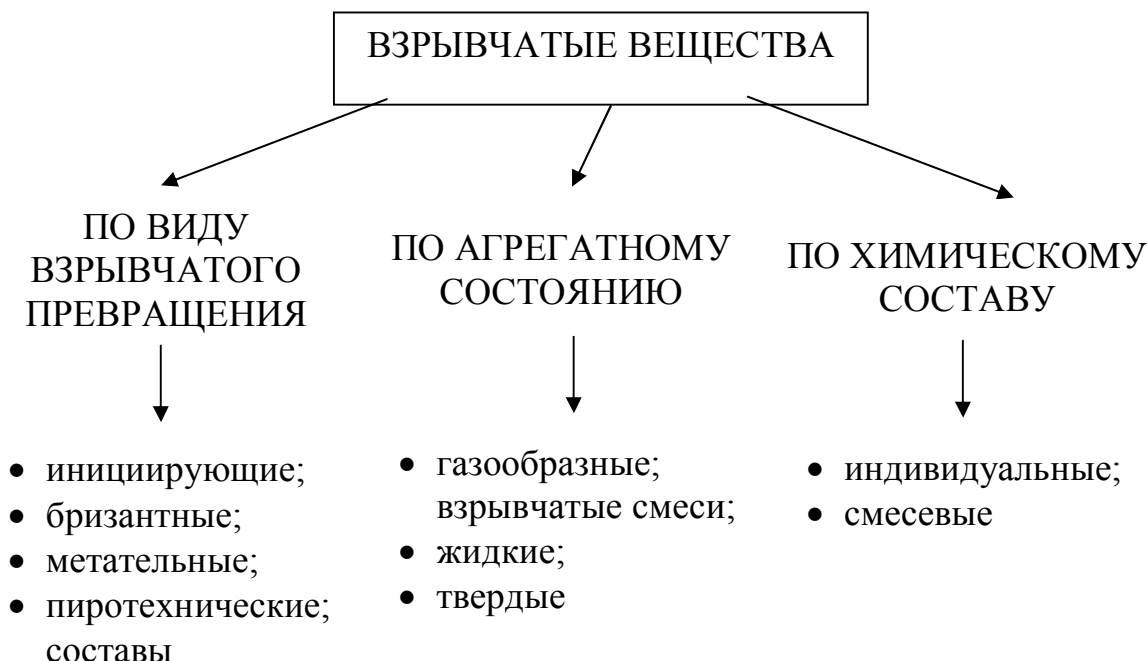
4.1. Основные понятия

Взрывчатые вещества (ВВ) – химические соединения или смеси веществ, способные к быстрому, самораспространяющемуся превращению, с выделением большого количества тепла и образованием газообразных продуктов. Быстрое образование газов, нагретых до высокой температуры за счет теплоты реакции, приводит к сильному повышению давления. При последующем расширении сжатых газообразных продуктов реакции их внутренняя энергия переходит в механическую работу раскалывания, дробления и отброса элементов окружающей среды – происходит взрыв.

Количество энергии, выделяющейся при взрыве ВВ относительно невелико. Даже при взрыве самого мощного ВВ (помимо атомных и термоядерных взрывов) выделяется в 5–6 раз меньше тепла, чем при сгорании на воздухе равного количества нефти. Однако, в отличие от обычных топлив, ВВ для превращения в газообразные продукты не требуют участия кислорода воздуха. Именно поэтому объемная концентрация энергии во взрывчатом веществе очень велика. В сочетании с очень большой скоростью химического превращения это делает ВВ концентрированным источником огромных мощностей. Так, при взрыве 1 кг тротила выделяется тепловой энергии примерно в 10 раз меньше, чем при сгорании 1 кг бензина. Однако сгорание 1 кг бензина в двигателях внутреннего сгорания происходит за 5–6 мин, в то время как взрыв 1 кг тротила происходит за 0,00001–0,00002 доли секунды, то есть энергия при взрыве выделяется в десятки миллионов раз быстрее, чем при обычном горении.

4.2. Классификация взрывчатых веществ

Взрывчатые вещества классифицируются по следующим признакам:



По виду взрывчатого превращения (или по условиям перехода горения в детонацию) ВВ делят на четыре группы:

I-я группа – *инициирующие* или первичные ВВ,

II-я группа – *бризантные* или вторичные ВВ,

III-я группа – *метательные* ВВ (пороха, твердые ракетные топлива);

IV-я группа – *пиротехнические составы*.

Физической основой для разделения ВВ на четыре группы является характеристика устойчивости горения и склонности перехода горения в детонацию.

I-я группа. Отличительной особенностью иницирующих ВВ (ИВВ) является их высокая чувствительность к внешним воздействиям. Удар, пламя или искра приводят к возникновению взрыва этих веществ. Характерным видом ВП для индивидуальных взрывчатых веществ (ИВВ) является детонация, так как горение очень легко и быстро (за время 10^{-6} – 10^{-8} с) переходит в детонацию.

ИВВ применяют для изготовления двух типов средств инициирования ВП: средств детонирования или возбуждения детонации и средств возбуждения горения. Для индивидуальных ИВВ, используемых в средствах детонирования, характерно бризантное действие. ИВВ для средств воспламенения обычно обладают ничтожной бризантностью, слабой фугасностью и интенсивным тепловым воздействием. Типичными представителями индивидуальных ИВВ являются: гремучая ртуть; азид свинца; тетразен и др.

II-я группа. Отличительной особенностью типичных бризантных (вторичных) ВВ является их сравнительно низкая чувствительность к возбуждению детонации при таких внешних воздействиях, как слабый удар, трение, искра и луч пламени, но в то же время высокая способность детонировать под действием взрыва детонатора, содержащего небольшую массу ИВВ.

Характерным, штатным режимом ВП бризантных ВВ является детонация, которая возбуждается ударными волнами, создаваемыми детонаторами, ударом быстролетающих (со скоростью 1 км/с и более) металлических тел, взрывом специальных зарядов (промежуточных детонаторов), что обуславливает достаточное, удобство и безопасность обращения с ВВ этой группы.

Вторичные ВВ обладают среди ВВ всех групп наибольшими бризантностью и фугасностью и поэтому используются в тех случаях, когда требуется обеспечить преимущественно бризантное или фугасное действие взрыва.

III-я группа. Метательные ВВ (МВВ) предназначены для метания тел в ствольных системах или создания реактивной тяги в ракетных двигателях. В соответствии с назначением они должны быть нечувствительными к внешним воздействиям, за исключением теплового, в качестве штатного режима ВП, иметь устойчивое послойное горение, обладать высоким метательным действием. МВВ делятся на пороха для ствольных систем и твердые ракетные топлива.

Пороха должны обеспечивать устойчивое горение без перехода во взрыв при давлениях до 10^8 – 10^9 Па, а твердые ракетные топлива – до 10^7 Па.

В настоящее время в ствольных системах применяют в основном нитроцеллюлозные пороха, на основе нитроклетчатки, пластифицированной каким-либо растворителем. В пороха вводят также специальные добавки, увеличивающие срок хранения и улучшающие характеристики горения. Твердые ракетные топлива делают либо на основе баллиститных порохов, либо в виде смесевых твердых топлив, и они состоят из окислителя, мощного бризантного ВВ, горючего и связующего. Окислителями обычно являются перхлораты или нитраты аммония, а горючими – алюминиевая пудра или связующее. В качестве связующего чаще используют полимеры, обычно каучукоподобные.

Основное отличие метательных и бризантных ВВ определяется не химическим составом, а физической структурой этих веществ.

IV-я группа. К пиротехническим составам (ПС), т. е. веществам, которые при горении дают световые, тепловые, дымовые, реактивные и звуковые эффекты относятся вещества не являющиеся взрывчатыми. Однако большинство ПС могут претерпевать ВП (а некоторые из них детонировать с сильным, бризантным действием), и поэтому их относят к ВВ.

ПС чувствительны к удару, трению, но менее чувствительны, чем вторичные ВВ и пороха, к лучу пламени. Наиболее распространенным видом ВП для ПС является послойное горение (более быстрое, чем у порохов), реже применяется конвективное, взрывное горение, и лишь в специальных случаях возбуждают детонацию ПС.

Возможность осуществления требуемого эффекта при медленном, невзрывном горении и заданного бризантного или фугасного действия при ВП обеспечивается соответствующим составом смеси. Большинство ПС, кроме горючего, содержит окислитель и некоторые другие специальные компоненты. В качестве горючих используют металлы Al, Mg, Zr, Ti, алюминиевомагниевого сплав с магнием, углеводородные смеси, углеводы. Окислителем обычно являются оксиды металлов Fe_3O_4 , MnO_2 , BaO_2 , PbO_2 , Pb_3O_4 или кислородсодержащие соли NaNO_3 , $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$, KNO_3 , KClO_4 , KCl_3 . Окислителями могут служить и бескислородные соединения: гексахлорэтан C_2Cl_6 , фторопласт-3. Часто догорание веществ происходит лишь благодаря кислороду воздуха, а иногда и весь процесс сгорания горючего обеспечивается полностью только кислородом воздуха.

По виду достигаемого эффекта ПС делятся на осветительные составы, фотосмеси, трассирующие составы, сигнальные составы, составы инфракрасного излучения, маскирующие дымообразующие составы, зажигательные составы.

По составу ВВ разделяют на две большие группы: *индивидуальные соединения* и *смеси*.

К индивидуальным ВВ относят химические соединения, у которых при внешних воздействиях происходит разрыв химических связей в молекулах с последующей рекомбинацией атомов в конечные продукты взрыва (ПВ), в результате чего горючие элементы соединяются с окислительными. Образование ПВ в этом случае можно рассматривать как внутримолекулярное окисление. Индивидуальные ВВ преимущественно являются органическими соединениями, содержащими одну или более групп NO_2 , из которых на практике чаще используют азотнокислые эфиры (нитроэфиры) и нитросоединения.

К индивидуальным соединениям относятся:

- нитросоединения, среди которых наибольшее значение имеют полинитросоединения ароматического ряда и их производные, например, тринитротолуол (тротил), тринитрофенол, тринитроксиллол, тринитробензол (ТНБ), динитронафталин и другие;
- нитроамины, например, циклотриметилентринитроамин (гексоген), циклотетраметилентетранитроамин (октоген), тринитрофенилметилнитроамин (тетрил), этилендинитроамин (эдна), динитрооксидиэтилнитрамин (дина) и другие;

- эфиры азотной кислоты многоатомных спиртов и углеводов, например, пентаэритриттетранитрат (ТЭН), глицеринтринитрат, или нитроглицерин, диэтиленгликольдинитрат, нитроцеллюлоза или пироксилин, и другие;

- соли азотной кислоты, например, *нитрат аммония*;
- соли гремучей кислоты, например, *гремучая ртуть*;
- соли азотистоводородной кислоты, например, *азид свинца*.

Известны также и другие классы взрывчатых соединений, практически имеющие меньшее значение.

Взрывчатые вещества второй группы – **взрывчатые смеси** – представляют собой композиции, состоящие, по крайней мере, из двух химически не связанных между собой веществ. Обычно один из компонентов относительно богат кислородом, а во втором, либо кислорода недостаточно для внутримолекулярного окисления, либо вовсе нет (углеводы, металлы – алюминий, магний). Взрывчатые смеси часто готовят из соединений, способных окисляться (горючих), и веществ, содержащих значительные количества окислителей (кислорода). При взрывчатом превращении элементы горючего окисляются за счет кислорода, содержащегося в окислителе. В качестве компонентов смесей применяют как ВВ, так и вещества, которые сами по себе невзрывчаты. Важнейшими классами смесей являются:

- пороха – баллиститные, пироксилиновые, смесевые;
- нитроглицериновые ВВ (динамиты) – смеси нитроглицерина, большей частью желатинированного небольшими количествами нитроцеллюлозы, с азотнокислыми солями и горючими веществами;
- аммиачно-селитренные ВВ – смеси, например хлората калия, перхлоратов калия или аммония с горючими веществами;
- смеси и сплавы нитросоединений и других ВВ, например, сплавы тротила с гексогеном;
- дымный порох – смеси селитры, серы и угля;
- оксиликвиты – твердые пористые горючие вещества, пропитанные жидким кислородом;
- жидкие смеси, например, концентрированной азотной кислоты, четырехокси азота или других жидких окислителей с жидкими горючими.

Существуют и другие подходы в классификации ВВ и составов на их основе, например:

- по функциональному типу взрывного устройства, в котором используется тот или иной состав: заряды для кумулятивных, осколочно-фугасных устройств и т. д.;
- по технологии изготовления заряда: литье, прессование, изготовленные методом вальцевания, экструзии, шнекованием;
- по условиям применения: воздушный, подводный подрыв, подземный (воронкообразование), взрыв в замкнутом объеме;

- по способу передачи энергии окружающей среде, механизму формирования поражающего элемента (кумулятивная струя, взрывоформирующий элемент, осколкообразование);

- по характеру технологической операции, выполняемой с использованием энергии взрыва (сварка взрывом, штамповка взрывом, компактирование).

Используемые для различных целей составы ВВ можно подразделить на мощные бризантные составы, мощные фугасные составы, бризантно-фугасные составы.

В зависимости от требований по параметрам и условиям применения, составы могут быть термостойкими, малочувствительными, низкоимпульсными, использоваться для средств подрыва, в малых калибрах, инженерных средствах, средствах трансляции детонационного импульса и т. д.

4.3. Характеристика взрывчатых веществ

Чувствительность взрывчатых веществ. Внешнее воздействие, результатом которого является взрывное превращение, протекающее в той или иной форме, называют начальным, или инициирующим, импульсом.

Для возбуждения взрывчатого превращения необходимо сообщить ограниченному объему ВВ определенное количество энергии, называемое **начальным импульсом**. Таким импульсом может служить нагревание, удар, трение, действие взрыва другого ВВ и др. Минимальная величина начального импульса, обеспечивающая возникновение взрыва, характеризует чувствительность ВВ, которая должна быть ограничена определенными пределами. Наибольшей чувствительностью обладают инициирующие ВВ, которые легко воспламеняются и детонируют от слабого механического и теплового импульса и служат поэтому для возбуждения взрыва других ВВ. Чувствительность к тепловому импульсу характеризуют температурой вспышки, к механическому – энергией удара, при которой получается определенная частота взрывов.

В табл. 4.1 приведены данные о температуре вспышки и чувствительности к удару некоторых ВВ.

Исследования чувствительности ВВ к тепловым, механическим и ударно-волновым воздействиям, как наиболее часто встречающимся в практике обращения с ВВ и взрывными устройствами, являются составной частью проблемы соотношения опасности и работоспособности. Чувствительность к ударно-волновым воздействиям, кроме того, связана не только с вопросами безопасности (стойкости) и надежности действия взрывных устройств, но и эффективностью и стабильностью действия ряда устройств, типа кумулятивных зарядов.

Таблица 4.1

Температура вспышки и чувствительность к удару
некоторых взрывчатых веществ

Взрывчатое вещество	Процент взрывов при падении груза в 10 кг с высоты 25 см	Температура вспышки, °С
Тротил	4...8	290
Тетрил	50...60	200
Гексоген	70...80	230
ТЭН	100	215
Аммонит № 6	20...30	280
Гремучая ртуть	—	180
Азид свинца	—	300

Стойкость ВВ – способность сохранять физические и химические свойства при длительном хранении: зависит от строения молекул или состава ВВ, степени его чистоты, состава примесей и условий хранения. Разложение нестойкого ВВ при хранении в неблагоприятных условиях может привести к самовоспламенению и взрыву. Практически химическую стойкость оценивают по времени достижения определенной (обычно небольшой) степени разложения при нагревании навески ВВ в стандартных условиях.

Энергия взрывчатого превращения и действия взрыва – максимальная работа, которая может быть произведена взрывом, определяется тепловой взрывчатого превращения, объемом и составом газообразных продуктов реакции. Эти величины находят расчетом либо определяют экспериментально. В последнем случае взрывают заряд ВВ в специальных бомбах, измеряют количество выделившегося тепла и давление газов и анализируют после охлаждения их состав.

В табл. 4.2 приведены данные, которыми обычно характеризуют ВВ.

При оценке механического эффекта взрыва обычно различают **дробящее действие** (бризантность), проявляющееся в непосредственной близости к заряду и **фугасное действие**, проявляющееся на некотором расстоянии от заряда (образование полости в грунте, выброс). Дробящее действие зависит от скорости детонации и плотности ВВ и оценивается максимальным давлением во фронте детонации.

Фугасное действие оценивается по увеличению канала свинцовой бомбы стандартных размеров после взрыва в нем небольшой навески (10 г) ВВ. Для возбуждения детонации ВВ служат капсули-детонаторы, представляющие собой металлическую или бумажную гильзу, в которую запрессованы небольшой (0,05...0,5 г) заряд инициирующего ВВ и несколько больший заряд мощного вторичного ВВ.

Таблица 4.2

Характеристика взрывчатых веществ

Название ВВ	Теплота взрыва, ккал/кг	Объем продуктов взрыва (при 0° и 1 ат.), л/кг	Скорость детонации (при максимальной плотности), м/с	Обжатие свинцового цилиндра (при плотности 1 г/м ³), мм	Расширение свинцовой бомбы, см ³
Тротил	1000	750	7000	16	285
Тетрил	1100	740	7400	18	340
Гексоген	1300	890	8400	22	480
Аммонит № 6	1020	900	4500	14...18	370
Нитроглицерин	1530	720	8000	23	520
Бездымный порох	600...1200	750...940	—	—	—
Дымный порох	660	280	—	—	—

При действии луча огня или накале инициирующее ВВ детонирует и вызывает взрыв вторичного заряда, который возбуждает детонацию массы ВВ, где был помещен капсюль-детонатор.

4.4. Химические реакции взрывных превращений

Конечный итог реакций взрывного превращения выражают обычно уравнением, связывающим химическую формулу исходного ВВ или состав его (в случае взрывчатой смеси) с составом конечных продуктов взрыва.

Знание уравнения химического превращения при взрыве существенно в двух отношениях. С одной стороны, по этому уравнению можно рассчитать теплоту и объем газообразных продуктов взрыва, а следовательно, и температуру, давление и другие его параметры. С другой стороны, состав продуктов взрыва получает особое значение, если речь идет о ВВ, предназначенных для взрывных работ в подземных выработках (отсюда – расчет рудничной вентиляции, чтобы количество окиси углерода и окислов азота не превосходило определенного объема).

Однако при взрыве не всегда устанавливается химическое равновесие. В тех многочисленных случаях, когда расчет не позволяет надежно установить итоговое равновесие взрывного превращения, – обращаются к эксперименту. Но экспериментальное определение состава продуктов в момент взрыва также встречает серьезные трудности, так как в продуктах взрыва при высокой температуре могут содержаться атомы и свободные радикалы (активные частицы), обнаружить которые после охлаждения не удастся.

Органические ВВ, как правило, состоят из углерода, водорода, кислорода и азота. Следовательно, в продуктах взрыва могут содержаться сле-

дующие газообразные и твердые вещества: CO_2 , H_2O , N_2 , CO , O_2 , H_2 , CH_4 и другие углеводороды: NH_3 , C_2N_2 , HCN , NO , N_2O , C . Если в состав ВВ входят сера или хлор, то в продуктах взрыва могут содержаться соответственно SO_2 , H_2S , HCl и Cl_2 . В случае содержания в составе ВВ металлов, например, алюминия или некоторых солей (например, нитрата аммония NH_4NO_3 , нитрата бария $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$; хлоратов – хлората бария $\text{Ba}(\text{ClO}_3)_2$, хлората калия KClO_3 ; перхлоратов – аммония NHClO_4 и др.) в составе продуктов взрыва встречаются оксиды, например Al_2O_3 , карбонаты, например, карбонат бария BaCO_3 , карбонат калия K_2CO_3 , бикарбонаты (KHCO_3), цианиды (KCN), сульфаты (BaSO_4 , K_2SO_4), сульфиды (NS , K_2S), сульфиты ($\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_3$), хлориды (AlCl_3 , BaCl_2 , KCl) и другие соединения.

Наличие и количество тех или иных продуктов взрыва в первую очередь зависит от кислородного баланса состава ВВ.

Кислородный баланс характеризует соотношение между содержанием во взрывчатом веществе горючих элементов и кислорода.

Вычисляют кислородный баланс обычно как разность между весовым количеством кислорода, содержащегося во ВВ, и количеством кислорода, потребным для полного окисления горючих элементов, входящих в его состав. Расчет ведут на 100 г ВВ, в соответствии, с чем кислородный баланс выражают в процентах. Обеспеченность состава кислородом характеризуется кислородным балансом (КБ) или кислородным коэффициентом α_K , которые в относительных величинах выражают избыток или недостаток кислорода для полного окисления горючих элементов до высших оксидов, например, CO_2 и H_2O .

Если ВВ содержит как раз столько кислорода, сколько нужно для полного окисления входящих в его состав горючих элементов, то кислородный баланс его равен нулю. Если избыток – КБ положителен, при недостатке кислорода – КБ отрицателен. Сбалансированность ВВ по кислороду соответствует КБ = 0; $\alpha_K = 1$.

Если ВВ содержит углерод, водород, азот и кислород и описывается уравнением $\text{C}_a\text{H}_b\text{N}_c\text{O}_d$, то величины кислородного баланса и кислородного коэффициента могут определяться по формулам

$$\text{КБ} = \frac{\left[d - \left(2a + \frac{b}{2} \right) \right] \cdot 16}{12a + b + 14c + 16d} \cdot 100, \% , \quad (1)$$

$$\alpha_K = \frac{d}{2a + \frac{b}{2}} , \quad (2)$$

где a , b , c и d – число атомов соответственно C , H , N и O в химической формуле ВВ; 12, 1, 14, 16 – округленные до целого числа атомные массы соот-

ветственно углерода, водорода, азота и кислорода; знаменатель дроби в уравнении (1) определяет молекулярную массу ВВ: $M = 12a + b + 14c + 16d$.

С точки зрения безопасности производства и эксплуатации (хранения, транспортирования, применения) ВВ большинство их рецептур имеют отрицательный кислородный баланс.

По кислородному балансу все ВВ подразделяются на три группы:

I группа – ВВ с положительным кислородным балансом: углерод окисляется до CO_2 , водород до H_2O , азот и избыток кислорода выделяются в элементарном виде.

II группа – ВВ с отрицательным кислородным балансом, когда кислорода недостаточно для полного окисления компонентов до высших оксидов и углерод частично окисляется до CO (но все ВВ превращаются в газы).

III группа – ВВ с отрицательным кислородным балансом, но кислорода недостаточно для превращения всех горючих компонентов в газы (в продуктах взрыва имеется элементарный углерод).

4.4.1. Расчет состава продуктов взрывчатого разложения ВВ с положительным кислородным балансом (I группа ВВ)

При составлении уравнений реакций взрыва ВВ с положительным кислородным балансом руководствуются следующими положениями: углерод окисляется до углекислоты CO_2 , водород до воды H_2O , азот и избыток кислорода выделяются в элементарном виде (N_2 , O_2).

Пример.

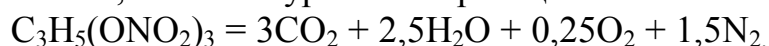
1. Составить уравнение реакции (определить состав продуктов взрыва) взрывчатого разложения индивидуального ВВ.

Нитроглицерин: $\text{C}_3\text{H}_5(\text{ONO}_2)_3$, $M = 227$.

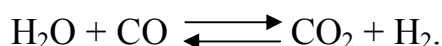
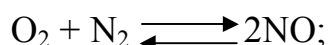
Определяем величину кислородного баланса для нитроглицерина:

$$\text{КБ} = \frac{\left[d - \left(2a + \frac{b}{2} \right) \right] \cdot 16}{M} \cdot 100 = \frac{\left[9 - \left(2 \cdot 3 + \frac{5}{2} \right) \right] \cdot 16}{227} \cdot 100 = 3,5\%,$$

$\text{КБ} > 0$, запишем уравнение реакции:



Кроме основной реакции протекают реакции диссоциации:



Но так как КБ = 3,5 (намного больше нуля) – реакции смещены в сторону образования CO_2 , H_2O , N_2 , следовательно доля газов CO , H_2 и NO в продуктах взрывчатого разложения незначительна и ими можно пренебречь.

2. Составить уравнение реакции взрывчатого разложения смесового ВВ: аммонала, состоящего из 80 % аммиачной селитры NH_4NO_3 ($M = 80$), 15 % тротила $\text{C}_7\text{H}_5\text{N}_3\text{O}_6$ ($M = 227$) и 5 % алюминия Al (а.м. $M = 27$).

Расчет кислородного баланса и коэффициента α_k смесовых ВВ ведут следующим образом: вычисляют количество каждого из химических элементов, содержащихся в 1 кг смеси и выражают его в молях. Затем составляют условную химическую формулу для 1 кг, смесового ВВ, аналогичную по виду химической формуле для индивидуального ВВ и далее ведут расчет аналогично выше приведенному примеру.

Если в смесовом ВВ содержится алюминий, то уравнения для определения величин КБ и α_k имеют следующий вид:

$$\text{КБ} = \frac{\left[d - \left(2a + \frac{b}{2} + \frac{3}{2}e \right) \right] \cdot 16}{1000} \cdot 100, \%,$$

$$\alpha_k = \frac{d}{2a + \frac{b}{2} + \frac{3}{2}e},$$

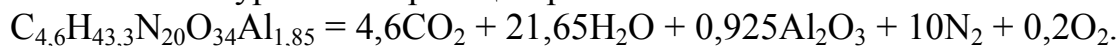
где e – число атомов алюминия в условной формуле.

1. Рассчитываем элементарный состав 1 кг аммонала и записываем его условную химическую формулу

$$\frac{800}{80} \text{NH}_4\text{NO}_3 + \frac{150}{227} \text{C}_7\text{H}_5\text{O}_6 + \frac{50}{27} \text{Al} = \text{C}_{4,6} \text{H}_{43,3} \text{N}_{20} \text{O}_{34} \text{Al}_{1,85},$$

$$\text{КБ} = \frac{\left[34 - \left(2 \cdot 4,6 + \frac{43,3}{2} + \frac{3}{2} \cdot 1,85 \right) \right] \cdot 16}{1000} \cdot 100 = 0,6 \, \%.$$

2. Записываем уравнение реакции разложения аммонала:



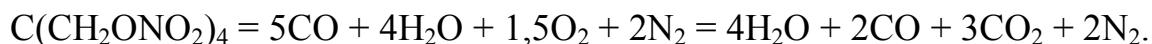
4.4.2. Расчет состава продуктов взрывчатого разложения ВВ с отрицательным кислородным балансом (II группа ВВ)

Как было отмечено ранее при составлении уравнений реакций взрывчатого разложения ВВ второй группы необходимо учитывать следующие особенности: водород окисляется до H_2O , углерод окисляется до CO , оставшийся кислород окисляет часть CO до CO_2 и азот выделяется в виде N_2 .

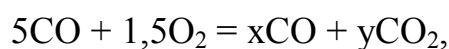
Пример. Составить уравнение реакции взрывчатого разложения пентаэритриттетранитрата (тэна) $C(CH_2ONO_2)_4$ $M_{\text{тэна}} = 316$. Кислородный баланс равный – 10,1%.

Из химической формулы тэна видно, что кислорода до полного окисления водорода и углерода недостаточно (для 8 водородов необходимо 4 ат. кислорода, чтобы превратить в $H_2O = 4H_2O$) (для 5 атомов углерода необходимо 10 атомов кислорода, чтобы превратить в $CO_2 = 5CO_2$) итого требуется: $4 + 10 = 14$ атомов кислорода, а их всего 12 атомов.

1. Составляем уравнение реакции разложения тэна:



Для определения величины коэффициентов CO и CO₂:



$x + y = n$ – сумма атомов углерода,

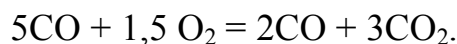
$x + 2y = m$ – сумма атомов кислорода,

или

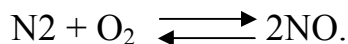
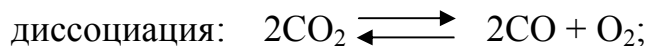
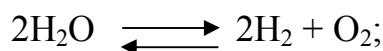
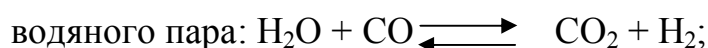
$$\begin{cases} x + y = 5 \\ x + 2y = 8 \end{cases} \quad \text{или} \quad \begin{cases} x = 5 - y \\ x = 8 - 2y \end{cases}$$

$$\text{или } 5 - y = 8 - 2y; \quad y = 8 - 5 = 3; \quad x = 5 - 3 = 2.$$

Таким образом, коэффициент при CO $x = 2$; при CO₂ $y = 3$, т. е.

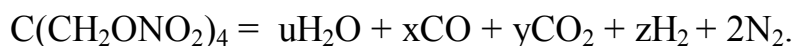


Вторичные реакции (диссоциации):



2. Для оценки погрешности рассчитаем состав продуктов реакции взрывчатого разложения с учетом наиболее существенной из вторичных реакций – реакции водяного пара ($H_2O + CO \rightleftharpoons CO_2 + H_2$).

Уравнение реакции взрывчатого разложения тэна представим в виде:



Температура взрывчатого разлива тэна примерно 4000 К.
Соответственно константа равновесия водяного пара [6]:

$$K_p = \frac{[CO] \cdot [H_2O]}{[CO_2] \cdot [H_2]} = \frac{x \cdot u}{y \cdot z} = 8,148.$$

Записываем и решаем систему уравнений:

$$\frac{x \cdot u}{y \cdot z} = 8,148,$$

$x + y = 5$ (см. выше) – число атомов углерода;

$2z + 2y = 8$ – число атомов водорода;

$x + 2y + u = 12$ – число атомов кислорода.

Преобразование системы уравнений сводится к получению квадратного уравнения $ay^2 + by + c = 0$:

$$7,15y^2 - 12,45y - 35 = 0.$$

Решение его имеет вид:

$$y_{1,2} = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a},$$

или

$$y = \frac{12,45 + \sqrt{12,45^2 + 4 \cdot 7,15 \cdot 35}}{2 \cdot 7,15} = 3,248,$$

$y = 3,248$, тогда $x = 1,752$; $z = 0,242$; $u = 3,758$.

Таким образом, уравнение реакции принимает вид:



Из полученного уравнения видно, что погрешность в определении состава и количества продуктов взрывчатого разложения приближенным способом незначительна.

4.4.3. Составление уравнений реакций взрывчатого разложения ВВ с отрицательным КБ (III группа)

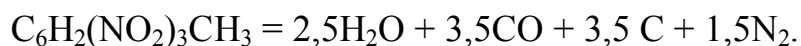
При написании уравнений реакции взрывчатого разложения для третьей группы ВВ необходимо придерживаться следующей последовательности:

- 1) определить по химической формуле ВВ его КБ;
- 2) водород окислить до H_2O ;
- 3) углерод окислить остатками кислорода до CO ;
- 4) написать остальные продукты реакции, в частности C , N и т.д.;
- 5) проверить коэффициенты.

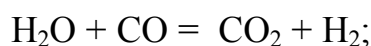
Пример. Составить уравнение реакции взрывчатого разложения тринитротолуола (тротила, тола) $C_6H_2(NO_2)_3CH_3$.

Молярная масса $M = 227$; КБ = $-74,0\%$.

Из химической формулы видим, что кислорода недостаточно для окисления углерода и водорода: для полного окисления водорода необходимо 2,5 атома кислорода, неполного окисления углерода – 7 атомов (всего 9,5 по сравнению с имеющимися 6 атомами). В этом случае уравнение реакции разложения тротила имеет вид:



Вторичные реакции:



4.5. Объем продуктов взрывчатого разложения

Газообразные продукты взрыва являются тем непосредственным агентом, при помощи которого выделяющаяся энергия превращается в работу. Наряду с этим знание объема и состава газообразных продуктов взрыва позволяет рассчитать максимальную температуру, которая могла быть достигнута при этом.

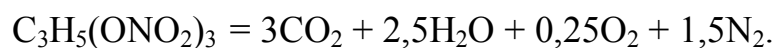
Объем продуктов взрыва одного килограмма ВВ определяется по формуле

$$V_0 = \frac{V_\mu (n_{CO_2} + n_{CO} + n_{H_2O} \dots n_{N_2})}{n_{ВВ} \cdot M}, \text{ м}^3/\text{кг},$$

где $V_\mu = 22,4 \text{ м}^3/\text{кмоль}$ – объем 1 кмоль газа (при 0°C и 101325 Па); $n_{CO_2} + n_{CO} + n_{H_2O} \dots n_{N_2}$ и $n_{ВВ}$ – число n молей диоксида углерода, оксида углерода, паров воды, других газообразных компонентов продуктов взрыва, азота и исходного ВВ в уравнении реакции взрывчатого разложения.

Примеры (для ВВ, рассмотренных в предыдущем разделе).

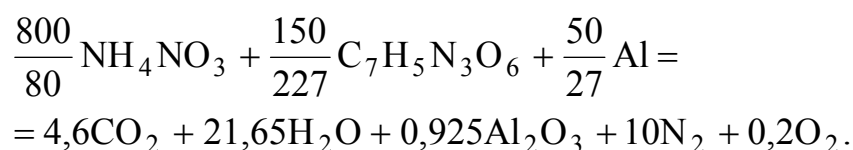
1. Определить объем продуктов взрыва 1 кг нитроглицерина $C_3H_5(ONO_2)_3$. Уравнение реакции взрывчатого разложения:



Определяем объем:

$$V_0 = \frac{V_\mu (n_{\text{CO}_2} + n_{\text{H}_2\text{O}} + n_{\text{O}_2} + n_{\text{N}_2})}{n_{\text{ВВ}} \cdot M} = \frac{22,4(3 + 2,5 + 0,25 + 1,5)}{1 \cdot 227} = 0,715 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

2. Рассчитать объем газообразных продуктов взрыва для аммонала, состоящего из аммиачной селитры, тротила и алюминия. Уравнение реакции:



Объем газообразных продуктов взрыва смесевых ВВ определяется по формуле

$$V_0 = \frac{V_\mu (n_{\text{CO}_2} + n_{\text{H}_2\text{O}} + n_{\text{O}_2} + n_{\text{N}_2})}{l_1 \cdot M_1 + l_2 \cdot M_2 + \dots l_n \cdot M_n}, \text{ м}^3/\text{кг},$$

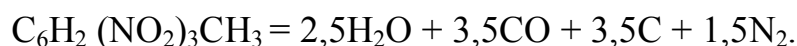
где $l_1, l_2, \dots l_n$ – число кмоль веществ и соединений, входящих в состав смесевого ВВ; $M_1, M_2, \dots M_n$ – молекулярные массы соответствующих компонентов ВВ.

Определяем объем газообразных продуктов:

$$V_0 = \frac{22,4(4,6 + 21,65 + 10,0 + 0,2)}{10 \cdot 80 + 0,66 \cdot 227 + 1,85 \cdot 27} = \frac{22,4 \cdot 37,45}{1000} = 0,839 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

3. Вычислить объем газообразных продуктов взрыва 1 кг тротила $\text{C}_6\text{H}_2(\text{NO}_2)_3\text{CH}_3$.

Уравнение его взрывчатого разложения:



Определяем объем газообразных продуктов:

$$V_0 = \frac{22,4(2,5 + 3,5 + 1,5)}{1 \cdot 227} = 0,740 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Примечание. Твердые частицы углерода в объем газообразных продуктов не включаются.

Последовательность определения объема газообразных продуктов взрыва:

- 1) пользуясь формулами, определить или проверить величину кислородного баланса;
- 2) написать уравнение реакции взрывчатого разложения ВВ;
- 3) определить число к/молей газообразных продуктов реакции;
- 4) при необходимости определить молекулярную массу ВВ (М);
- 5) определить объем газообразных продуктов взрыва.

Чем меньше молекулярная масса газообразных продуктов взрыва, тем больше величина V_0 .

4.6. Теплота и температура взрыва

Механическую работу взрыва производят расширяющиеся газообразные продукты взрывчатого превращения, нагретые до высокой температуры за счет теплоты, выделившейся при этом превращении. Теплота взрыва, а также объем образовавшихся газов позволяют оценить возможную работоспособность (фугасное действие) ВВ. Знание теплоты взрыва с учетом плотности ВВ и скорости детонации позволяет судить о разрушающем действии взрыва на среду в непосредственной близости от заряда (бризантное действие).

Для количественной характеристики метательного, дробящего, теплового и других видов действия необходимо знать теплоту взрыва, температуру и давление его продуктов.

4.6.1. Теплота взрыва

Теплота (количество тепла) – внутренняя энергия системы, которая самопроизвольно переходит от тел более нагретых, к телам менее нагретым путем теплопроводности или теплоизлучения.

Теплота взрыва – количество тепловой энергии, выделяющейся при взрывном превращении (горении или детонации) определенной массы ВВ. В технике за единицу массы при расчетах теплоты взрыва принимают 1 кг. Размерность теплоты взрыва кДж/кг. Для определения теплоты взрыва применяются два метода: расчетный и экспериментальный.

Расчет теплоты взрыва. Теплоту взрыва рассчитывают на основе закона Гесса, согласно которому «тепловой эффект химического превращения системы зависит только от начального и конечного ее состояния и не зависит от промежуточных состояний, т. е. от пути перехода». На основании этого закона выделившаяся при взрыве теплота равна разности теплот образования исходного вещества и конечных продуктов:

$$Q_v = Q_1 - Q_2,$$

где Q_1 – сумма теплот образования продуктов взрыва; Q_2 – теплота образования ВВ.

Значения теплот Q_1 и Q_2 приведены в [6]. При расчетах теплоты взрыва применяют несколько методов.

1. Основной метод определения теплоты взрыва индивидуальных ВВ.

При вычислении теплоты взрыва по этому методу используют следующие исходные данные:

- теплоты образования ВВ;
- теплоты образования продуктов взрыва;
- уравнение реакции взрывчатого разложения.

Теплота взрыва 1 кг ВВ определяется по формуле

$$Q_v = \frac{\sum_{j=1}^k n_j Q_{vj} - Q_{vBB}}{M} \cdot 1000, \text{ кДж/кг},$$

где n_j – число молей j -го продукта взрывчатого разложения в уравнении реакции; Q_{vj} – теплота образования j -го продукта взрывчатого разложения при постоянном объеме, кДж/моль; Q_{vBB} – теплота образования ВВ при постоянном объеме, кДж/моль; M – масса ВВ, численно равная его молярной массе, кг/моль.

Последовательность расчета теплоты взрыва:

- написать уравнение взрывчатого разложения;
- найти значения Q_{vj} и Q_{vBB} по соответствующим таблицам;
- при необходимости произвести пересчет теплот образования веществ Q_p (при постоянном давлении) в Q_v (при постоянном объеме);
- рассчитать теплоту взрыва данного ВВ.

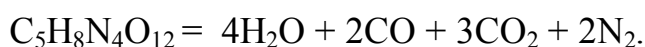
Пересчет Q_p в Q_v осуществляется по формуле

$$Q_v = Q_p + q = Q_p + 0,58 \cdot n, \text{ ккал/моль},$$

где 0,58 – множитель, представляющий собой выраженную в ккал работу расширения 1 моль газов при их нагревании от 0° до 18 °С, связанного с изменением объема при постоянном давлении равном 101325 Па; n – число молей ВВ и газообразных продуктов соответственно.

Пример. Определить теплоту взрыва 1 кг тэна $C_5H_8N_4O_{12}$. $M = 316$, теплота образования $Q_p = 129,37$ ккал/моль.

Пишем уравнение реакции взрывчатого разложения:



Выбираем из таблиц величины теплот образования продуктов разложения:

- вода (газ) H_2O – 57,78 ккал/моль;
- оксид углерода CO – 26,88 ккал/моль;
- диоксид углерода CO_2 – 94,51 ккал/моль;
- азот (газ) N_2 – 0,00 ккал/моль.

Вычисляем суммарную теплоту образования продуктов взрыва при постоянном давлении:

$$Q_p = 4 \cdot 57,78 + 2 \cdot 26,88 + 3 \cdot 94,51 = 568,72 \text{ ккал/моль.}$$

Произведем пересчет Q_p в Q_v ВВ (тэна):

$$Q_{vBB} = Q_p + 0,58n = 129,37 + 0,58 \cdot 1 = 129,95 \text{ ккал/моль,}$$

$$4,19 \cdot 129,95 = 544,5 \text{ кДж/моль;}$$

$$Q_{vNB} = Q_p + 0,58n = 568,72 + 0,58(4 + 2 + 3) = 573,94 \text{ ккал/моль,}$$

$$4,19 \cdot 573,94 = 2404,81 \text{ кДж/моль.}$$

Примечание: 1 кал = 4,19 Дж; 1 Дж = 0,239 кал.

Рассчитываем теплоту взрыва 1 кг тэна:

$$Q_v = \frac{Q_{vBB} - Q_{vNB}}{M} \cdot 1000 = \frac{2404,8 - 544,5}{316} \cdot 1000 = 5810 \text{ кДж/кг.}$$

2. Метод Г.А. Авакяна [11]

Данный метод позволяет рассчитать теплоту взрыва индивидуальных веществ, не прибегая к написанию уравнения реакции взрывчатого разложения. В основе метода лежит гипотеза о том, что суммарная теплота образования продуктов взрыва есть однозначная функция кислородного коэффициента ВВ:

$$\alpha_k = \frac{d}{2a + \frac{b}{2}} \cdot 100, \%,$$

где a , b и d – число атомов соответственно углерода, водорода и кислорода, входящих в ВВ (условная формула $\text{C}_a\text{H}_b\text{N}_c\text{O}_d$).

Теплота взрыва по этому методу определяется по формулам

$$Q_v = K(94a + 28,7b) - Q_{vBB}, \text{ ккал/моль при } \alpha_k \geq 100\%;$$

$$Q_v = K(47d + 5,25b) - Q_{vBB}, \text{ ккал/моль при } \alpha_k < 100\%.$$

где $K = 0,32 \alpha_k^{0,24}$ – «коэффициент реализации», согласующий результаты расчета с экспериментальными данными.

Пример. Определить теплоту взрыва 1 кг тэна $\text{C}_5\text{H}_8\text{N}_4\text{O}_{12}$; $M = 316$;

$$Q_p = 129,37 \text{ ккал/моль.}$$

Определяем α_k (кислородный коэффициент):

$$\alpha_k = \frac{d}{2a + \frac{b}{2}} \cdot 100 = \frac{12}{2 \cdot 5 + \frac{8}{2}} \cdot 100 = 85,7\%.$$

Производим пересчет Q_p в Q_v :

$$Q_{vBB} = Q_p + 0,58n = 129,37 + 0,58 \cdot 1 = 129,95 \text{ ккал/моль}.$$

Вычисляем теплоту взрыва 1 моля тэна:

$$\begin{aligned} Q_V^M &= 0,32 \cdot 85,7^{0,24} (47 \cdot 12 + 5,25 \cdot 8) - 129,95 = \\ &= 0,32 \cdot 2,91 \cdot 606 - 129,95 = 564,31 - 129,95 = 434,36 \text{ ккал/моль}. \end{aligned}$$

Рассчитываем теплоту взрыва 1 кг тэна в размерности СИ:

$$Q_v = 4,19 \frac{Q_V^M}{M} \cdot 1000 = 4,19 \frac{434,36}{316} \cdot 1000 = 5759,4 \text{ кДж/кг}.$$

3. Метод ориентировочного определения теплоты взрыва смесевых ВВ [11].

Для грубой оценки теплоты взрыва Q_v смесевых веществ можно воспользоваться правилом аддитивности (значение величины целого равно сумме величин частей), полагая, что каждый компонент вносит вклад в теплоту взрыва пропорционально своему содержанию в смеси:

$$Q_v = \sum_{i=1}^n v_i \cdot Q_{v_i}, \text{ кДж/кг},$$

где V_i и Q_{v_i} – массовая доля и теплота взрыва i -го компонента в смеси.

Пример. Определить теплоту взрыва 1 кг смеси тротила с гексогеном ТГ 50/50 (тротила и гексогена по 50% по массе).

1. Из таблицы находим теплоту взрыва Q_{v_i} (ккал/кг) тротила 1010, гексогена 1320.

2. Определяем теплоту взрыва смеси ТГ 50/50:

$$\begin{aligned} Q_v &= \sum_{i=1}^n v_i \cdot Q_{v_i} = 0,5 \cdot 1010 + 0,5 \cdot 1320 = 1165 \text{ ккал/моль} = \\ &= 4,19 \cdot 1165 = 4881,35 \text{ кДж/кг}. \end{aligned}$$

3. Уточненный метод расчета теплоты взрыва смесевых ВВ.

Последовательность определения:

• составляется условная формула 1 кг смесевых ВВ, $C_a H_b N_c O_d$ с использованием соотношений:

$$a = \sum_{j=1}^k n_j a_j; \quad b = \sum_{j=1}^k n_j b_j; \quad c = \sum_{j=1}^k n_j c_j; \quad d = \sum_{j=1}^k n_j d_j,$$

где n_j – мольная доля j -го компонента смеси;

- составляется уравнение реакции;
- вычисляется молекулярная масса смеси;
- рассчитывается кислородный коэффициент α_k (как по методу Авакяна);
- определяется теплота образования 1 моля смеси по формуле

$$Q_{p_{\text{ВВ}}} = \sum_{j=1}^k n_j Q_{p_j};$$

- определяется теплота взрыва 1 кг смесового ВВ (по формуле основного метода определения теплоты взрыва индивидуальных ВВ) или (по формуле метода Авакяна).

Экспериментальное определение теплоты взрыва. Определение производят в калориметрических установках, состоящих из толстостенной стальной бомбы объемом от нескольких сотен кубических сантиметров до 50 л и жидкостного калориметра.

Перед опытом в калориметрической бомбе откачивают воздух, возможно также заполнение бомбы инертным газом, например азотом. Для определения количества тепла, выделившегося при взрыве, бомбу помещают в калориметр с точно отмеренным количеством калориметрической жидкости (обычно вода). Применение жидкостных калориметров связано с созданием сложных и дорогостоящих установок внушительных размеров. Поэтому в ряде методик в качестве калориметра используют саму бомбу, причем температуру ее измеряют термометрами Бекмана, расположенным в разных точках (рис. 4.1), опыты проводят в стандартных бомбах Бергло-Малера, Долгова или Бихеля.

Калориметрические бомбы обычно тарируют сжиганием в них навесок бензойной кислоты с точно определенной теплотой сгорания, при этом определяют так называемое тепловое значение калориметра, равное количеству тепла, поглощенного его массой при повышении температуры на 1°C.

В бомбе Бергло-Малера для вторичных и метательных ВВ можно определить только теплоту горения или теплоту взрыва только инициирующих ВВ и черного пороха (взрываются от накаливаемой проволоки). Для ВВ, которые взрываются только от капсюля-детонатора, используется бомба больших размеров (бомбы, применяемые в английских лабораториях или бомбы Апина и Беяева).

При определении «фугасной» теплоты навеску ВВ взрывают в тонкостенных оболочках из свинцовой фольги и стекла. При этом ПВ без существенного теплообмена с материалом оболочки свободно расширяются и отдают свое тепло калориметрической жидкости через стенки установки.

При определении «детонационной» теплоты ВВ массой 10–40 г взрывают в толстостенной медной или латунной оболочке. В этом случае, благодаря интенсивному теплообмену ПВ с разрушаемым материалом оболочки, происходит быстрое охлаждение ПВ с «закалкой» ложного равно-

весия, то есть фиксацией их химического состава, близкого к начальному составу ПД в детонационной волне.

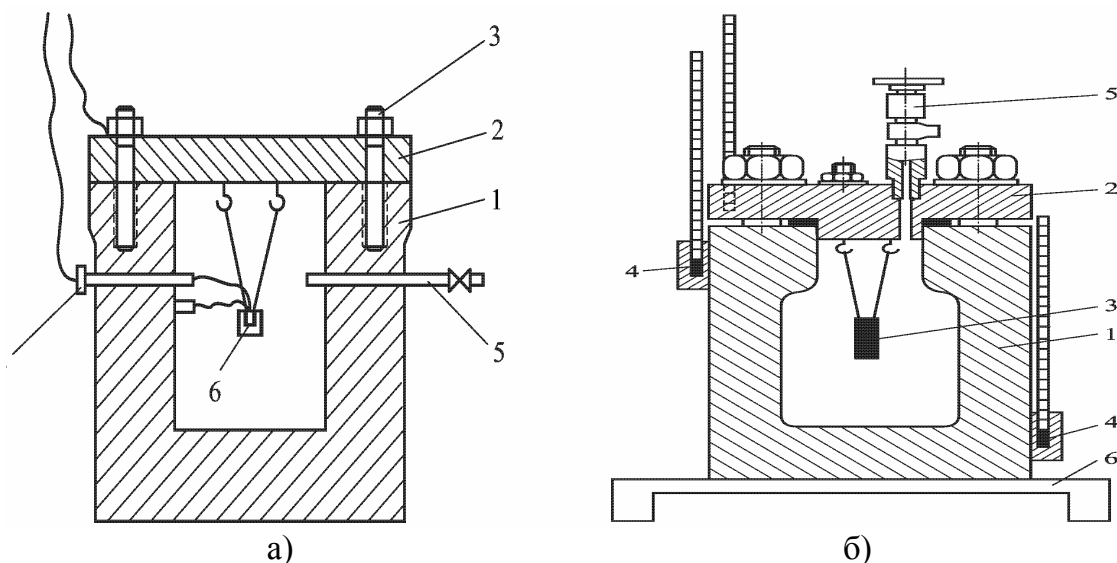


Рис. 4.1. Установки для определения теплоты взрыва: а – Бомба Бихеля (1 – корпус; 2 – крышка; 3 – болты; 4 – электроизолированный ввод; 5 – вентиль для отбора газа; 6 – заряд ВВ); б – схема калориметрической установки (1 – корпус; 2 – крышка; 3 – заряд ВВ; 4 – термометры; 5 – вентиль; 6 – подставка)

Применение оболочек из различных материалов (в том числе золота) и различной толщины является удобным методом физического моделирования взрывов с различной газодинамикой расширения ПВ при определении термохимических характеристик ВВ. Теплота взрыва каждого индивидуального ВВ не является его строгой константой, а варьируется в некоторых пределах и зависит от условий расширения ПВ, размеров заряда ВВ, а также его начальной плотности.

При оценке теплот взрыва, получаемых в калориметрических бомбах, тепловой эффект сильно зависит от условий, в которых происходит взрыв. Поэтому, полученные данные имеют лишь условное значение.

4.6.2. Температура продуктов взрыва

Основными термодинамическими характеристиками продуктов взрыва являются удельный объем V , температура T и давление P . Они связаны общим уравнением состояния (уравнение Менделеева-Клайперона для идеальных газов):

$$\rho V = nR \cdot T,$$

где n – количество молей газообразных продуктов взрыва; R – универсальная газовая постоянная, $R = 8,314$ Дж/моль $\cdot$ К.

Температура – один из основных термодинамических параметров, определяющих тепловое состояние вещества, тела, системы тел. Согласно молекулярно-кинетической теории, температура системы прямо пропорциональна средней кинетической энергии теплового движения частиц.

Передача тепла от одного тела к другому может происходить только при наличии разности температур (от более нагретого к менее нагретому).

Для измерения температуры применяют следующие температурные шкалы:

- абсолютную термодинамическую;
- международную практическую.

Единицей измерения по абсолютной термодинамической шкале является кельвин (К), а по международной практической – **градус Цельсия** (°C).

Соотношение в градусах: $T = t + 273$, К; $t = T - 273$, °C.

Под **температурой взрыва** понимают наибольшее значение температуры, до которого нагреваются продукты взрывчатого разложения. В основе вычисления этой температуры заложено предположение, что взрывчатое превращение – адиабатический процесс (система не обменивается теплотой с окружающей средой), протекающий при постоянном объеме и, таким образом, выделяющееся в процессе взрыва тепло расходуется только на нагрев продуктов взрыва. На основании изложенного теплота взрыва при постоянном объеме определяется по формуле

$$Q_V^M = C_V \cdot t_{пв}, \text{ кал/моль},$$

где C_V – суммарная молярная теплоемкость всех продуктов взрыва в интервале температур от нуля до температуры взрыва, кал/моль·град.; $t_{пв}$ – температура продуктов взрыва, °C.

Теплоемкость C_V является функцией температуры, ее можно определить по формуле Малляра и Ле Шателье (для температур более 1000 °C):

$$C_V = a + b t_{пв}, \text{ кал/моль·град.}$$

Тогда теплота взрыва определится выражением:

$$Q_V^M = (a + b t_{пв}) \cdot t_{пв}, \text{ кал/моль.}$$

$$\text{Отсюда: } t_{пв} = \frac{-a \pm \sqrt{a^2 + 4b Q_V^M}}{2b}, \text{ } ^\circ\text{C.}$$

Значения теплоемкостей 1 моля продуктов взрыва можно определить, используя следующие выражения, кал/моль·град:

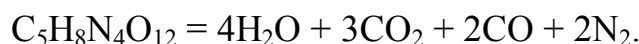
- для двухатомных газов (CO , N_2) $C_V = 4,8 + 4,5 \cdot 10^{-4} t_{пв}$;

- для воды $C_V = 4,0 + 21,5 \cdot 10^{-4} t_{\text{пв}}$;
- для диоксида углерода $C_V = 9,0 + 5,8 \cdot 10^{-4} t_{\text{пв}}$;
- для четырехатомных газов $C_V = 10 + 4,5 \cdot 10^{-4} t_{\text{пв}}$;
- для пятиатомных газов $C_V = 12 + 4,5 \cdot 10^{-4} t_{\text{пв}}$;
- для твердых продуктов взрыва $C_V = 6,4$.

Порядок определения температуры продуктов взрыва:

- 1) составить уравнение реакции взрывчатого разложения;
- 2) определить теплоту взрыва;
- 3) вычислить теплоемкость продуктов взрыва;
- 4) подсчитать суммарную молярную теплоемкость;
- 5) определить температуру продуктов взрыва.

Пример. Определить температуру продуктов взрыва тэна. Уравнение реакции взрыва тэна:



Теплота взрыва 1 моля тэна:

$$Q_V^M = Q_{V\text{пв}} - Q_{V\text{вв}} = (573940 - 129950) = 440000 \text{ кал/моль.}$$

(см. пример 1).

1. Записываем уравнения для расчета молярных теплоемкостей продуктов взрыва и вычисляем их суммарную теплоемкость:

$$C_V = m(a + b t_{\text{пв}}), \text{ кал/моль} \cdot \text{град};$$

$$\text{для } \text{H}_2\text{O}: 4(4,0 + 0,00215 t_{\text{пв}}) = 16,0 + 0,00880 t_{\text{пв}};$$

$$\text{для } \text{CO}_2: 3(9,0 + 0,0058 t_{\text{пв}}) = 27,0 + 0,00174 t_{\text{пв}};$$

$$\text{для } \text{CO}: 2(4,8 + 0,0045 t_{\text{пв}}) = 9,6 + 0,00090 t_{\text{пв}};$$

$$\text{для } \text{N}_2: 2(4,8 + 0,0045 t_{\text{пв}}) = 9,6 + 0,00090 t_{\text{пв}}.$$

$$\text{Суммарная теплоемкость } C_V = a + b t_{\text{пв}} = 62,2 + 0,01234 t_{\text{пв}}.$$

2. Определить температуру продуктов взрыва тэна:

$$t_{\text{пв}} = \frac{-a \pm \sqrt{a^2 + 4b Q_V^M}}{2b} = \frac{-62,2 + \sqrt{62,2^2 + 4 \cdot 0,01234 \cdot 440000}}{2 \cdot 0,01234} = 4006^\circ \text{C}.$$

Абсолютная температура продуктов взрыва тэна:

$$t_{\text{пв}} = 4006 + 273 = 4279 \text{ K}.$$

Расчеты температуры взрыва, как уже говорилось, основаны на предположении, что теплоемкость продуктов взрыва не зависит от давления. Это предположение можно считать справедливым для умеренных давлений. Однако при чрезвычайно высоких давлениях, которые достигаются при детонации конденсированных ВВ большой плотности значительная доля энергии взрыва представляет упругую часть энергии молекул высо-

коплотных продуктов взрыва. Тепловая часть существенно меньше, чем для газов при умеренных давлениях, и температура соответственно ниже, чем ее значение, получаемое обычным расчетом.

А.Я. Апин и И.М. Воскобойников экспериментально определили температуру взрыва ряда ВВ, используя цветовой оптический метод. Этот метод измерения температуры основан на том, что определяется распределение энергии по сплошному непрерывному спектру, характерному для детонации, или по отношению яркостей при двух длинах волны (метод «красно-синего» сравнения) [6].

4.7. Давление продуктов взрыва

Давление – физическая величина, характеризующая интенсивность сил, действующих на элемент поверхности тела нормально к этой поверхности.

При равномерном распределении силы F на поверхности площадью S давление P выражается формулой

$$P = \frac{F}{S}, \text{ Н/м}^2.$$

Эта единица называется паскалем (Па) $1 \text{ Па} = 1 \text{ Н/м}^2$.

В технической термодинамике различают давление:

- атмосферное (барометрическое);
- избыточное (манометрическое);
- вакууметрическое;
- абсолютное.

Атмосферным называется гидростатическое давление, оказываемое атмосферой на все имеющиеся в ней предметы. Для измерения атмосферного давления применяют ртутные и металлические барометры, измеряющие давление в миллиметрах ртутного или водяного столба.

Избыточное, сверхбарометрическое давление не является параметром состояния газа и в зависимости от давления окружающей среды может принимать различные значения для одного и того же газа. Избыточное давление измеряют специальными приборами – манометрами.

Вакууметрическое давление (разряжение) – разность между атмосферным и абсолютным давлением меньше атмосферного (измеряется вакууметрами).

Под **абсолютным** давлением подразумевается полное давление, под которым находится газ (сумма давлений избыточного и окружающей среды).

Давление горения – давление создаваемое газообразными продуктами горения ВВ в частично или полностью замкнутой оболочке.

Давление продуктов взрыва $P_{ВЗР}$ – максимальное давление продуктов взрывчатого разложения в объеме самого ВВ, отвечающее как бы мгновенному взрыву всей его массы перед началом расширения продуктов взрыва. Давление продуктов взрыва является энергетической характеристикой, по которой сравнивают работоспособность различных ВВ. Чем больше величина $P_{ВЗР}$ при прочих равных условиях, тем большую работу может совершить данное ВВ. Давление продуктов взрыва единицы массы ВВ можно определить аналитическим расчетом или экспериментально.

4.7.1. Расчет величины давления продуктов взрыва

В практике инженерных расчетов величины $P_{ВЗР}$ используется уравнение состояния реального газа Ван-Дер-Ваальса:

$$(P + \beta) (V - \alpha) = nRT,$$

где $P = P_{ВЗР}$ – давление продуктов взрыва, Па; β – приращение давления за счет сил взаимодействия между молекулами, уменьшающееся с увеличением температуры; в рассматриваемом случае (для взрыва) температура газообразных продуктов высока, поэтому величиной β пренебрегают, т. е. $\beta = 0$; V – объем, занимаемый продуктами взрыва, подсчитанный по заданной плотности заряда ВВ $P_{ВВ}$ по формуле

$$V = \frac{m}{P_{ВВ}}, \text{ м}^3,$$

где R – газовая постоянная, $R = 8,34$ Дж/моль·К; α – коволюм (объем газов, сжатых до плотности твердого вещества при взрыве); его величина тем больше, чем выше давление продуктов взрыва:

$$\alpha = 0,001 V_0, \text{ м}^3,$$

где V_0 – объем продуктов взрывчатого разложения,

$$V_0 = \frac{V_{\mu} (n_{\text{CO}_2} + n_{\text{CO}} + n_{\text{H}_2\text{O}} + \dots + n_{\text{N}_2})}{n_{ВВ} M}, \text{ м}^3,$$

$V_{\mu} = 22,4$ м³/кмоль, $n_{\text{CO}_2} \dots$ – число киломолей соответственно.

По расчетам О.Е.Власова [5] коволюм продуктов взрыва для некоторых индивидуальных ВВ с плотностью $P_{ВВ} = 1500$ кг/м³ при детонационном давлении имеет значения, м³/кг:

- тротила $5,80 \cdot 10^{-4}$;
- гексогена $4,84 \cdot 10^{-4}$;
- тэна $4,03 \cdot 10^{-4}$.

Число молей газообразных продуктов взрывчатого разложения 1 кг ВВ определяется по формуле

$$n = \frac{1000}{M} (n_{\text{H}_2\text{O}} + n_{\text{CO}_2} + n_{\text{CO}} + \dots n_{\text{N}_2}),$$

где $n_{\text{H}_2\text{O}}$, n_{CO_2} , n_{CO} , ... n_{N_2} – число молей всех газообразных компонентов продуктов взрывчатого разложения.

При отрицательном КБ ВВ взрывчатое разложение сопровождается образованием конденсированных частиц, например, углерода. Кроме того, в смесевых ВВ часто присутствуют металлические добавки, например, Al, образующие при взрыве конденсированные частицы окислов металлов. Объем, занимаемый этими частицами α_k так же необходимо учитывать. Удельные объемы некоторых твердых веществ при давлении и температуре взрыва следующие, м³/кг:

- углерод аморфный C – 0,008;
- оксид алюминия Al₂O₃ – 0,026 · 10⁻³.

Величину α_k можно определить по формуле

$$\alpha_k = \frac{M_k}{M_{\text{ВВ}}} \cdot n_k \cdot \frac{1}{\rho_k}, \text{ м}^3,$$

где M_k n_k – атомная (молекулярная) масса и число молей вещества, образующего конденсированные частицы; ρ_k – плотность конденсированных частиц, кг/м³, углерода C – 2250; оксида алюминия Al₂O₃ – 4000.

С учетом изложенного, уравнение по расчету давления продуктов взрыва примет вид:

$$P_{\text{ВЗР}}(V - \alpha - \alpha_k) = nRT_{\text{ВЗР}}.$$

Отсюда максимальное давление продуктов взрыва 1 кг ВВ определится по следующей формуле

$$P_{\text{ВЗР}} = \frac{nRT_{\text{ВЗР}}}{V - \alpha - \alpha_k}, \text{ Па.}$$

Последовательность определения давления продуктов взрыва:

- 1) определить объем продуктов взрыва 1 кг ВВ перед началом их расширения по заданной плотности заряда ВВ;
- 2) написать уравнение реакции взрывчатого разложения;
- 3) определить число молей газообразных продуктов взрывчатого разложения 1 кг ВВ;
- 4) определить температуру взрыва;

- 5) вычислить коволюм продуктов взрывчатого разложения;
- 6) при необходимости определить объем занимаемой твердыми частицами в составе продуктов взрыва;
- 7) подсчитать величину давления продуктов взрыва.

Пример. Определить давление продуктов взрыва 1 кг тротила $C_7H_5N_3O_6$, $M = 227$, $P_{ВВ} = 1000$ кг/м³.

Уравнение реакции: $C_7H_5N_3O_6 = 2,5H_2O + 3,5CO + 3,5C + 1,5N_2$.

Температура взрыва $T_{ВЗР} = 3\,373$ К, начальный объем продуктов взрыва $V_0 = 0,74$ м³/кг.

Вычислим объем продуктов взрыва 1 кг ВВ по заданной плотности заряда:

$$V = \frac{m}{P_{ВВ}} = \frac{1}{1000} = 1 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3.$$

1. Определим число молей газообразных продуктов взрывчатого разложения 1 кг тротила:

$$n = \frac{1000}{M} (n_{H_2O} + n_{CO} + n_{N_2}) = \frac{1000}{227} (2,5 + 3,5 + 1,5) = 33.$$

2. Вычисляем коволюм продуктов взрывчатого разложения:

$$\alpha = 0,001 V_0 = 0,001 \cdot 0,74 = 0,74 \cdot 10^{-3}, \text{ м}^3.$$

3. Определяем объем, занимаемый конденсированными частицами (углеродом):

$$\alpha_k = \frac{M_k}{M_{ВВ}} \cdot n_k \cdot \frac{1}{P_k} = \frac{12}{227} \cdot 3,5 \cdot \frac{1}{2250} = 0,08 \cdot 10^{-3}, \text{ м}^3.$$

4. Рассчитываем давление продуктов взрыва 1 кг тротила:

$$P_{ВЗР} = \frac{nRT_{ВЗР}}{V - \alpha - \alpha_k} = \frac{33 \cdot 8,314 \cdot 3373}{(1 - 0,74 - 0,08) \cdot 10^{-3}} = \frac{925423}{0,18 \cdot 10^{-3}} = 5141238889 \text{ Па} = 5141 \text{ МПа} \approx 51412 \text{ кг/см}^2.$$

Для экспериментального определения давления взрыва в постоянном объеме применяют манометрическую бомбу. Первая конструкция такой бомбы была предложена Сарро и Вьелем. Описание конструкции этой бомбы и эксперимента по определению давления продуктов взрыва приведено в [6].

Опытное определение давления продуктов взрыва производится с помощью специальных датчиков, подключенных к осциллографу. Наибольшее распространение нашли датчики, представляющие собой упругие элементы, которые под давлением деформируются.

Деформация датчиков фиксируется проволочными тензометрами и записывается с помощью осциллографа. В результате получается кривая изменения давления во времени в некотором объеме. Если необходимо определить только максимальное давление, то используются так называемые крещерные приборы. Датчиком при определении давления в таком приборе является крещер – медный цилиндр или конус. При увеличении давления стальной цилиндр нажимает на крещер и деформирует его. По величине остаточной деформации крещера и таблице или графику, где указана зависимость деформации крещера от давления, определяется давление взрыва, которое воздействует на крещерный прибор.

5. УДАРНЫЕ ВОЛНЫ

В теории взрыва **ударная волна** – это область сжатия с резким скачком давления, плотности и температуры на переднем фронте, распространяющаяся в среде со сверхзвуковой скоростью.

Ударные волны, возникающие при взрыве, могут распространяться в любых средах: воздухе, воде, грунте, бетоне, металле и пр. Наиболее важным практически и потому наиболее изученным является случай ударной волны в воздухе. Воздушную ударную волну иногда называют также *взрывной волной*.

5.1. Общие сведения о воздушной ударной волне

При взрыве сферического заряда ВВ в неограниченной однофазной среде область ударной волны (область сжатия) представляет собой жаровой слой, центр которого совпадает с центром взрыва, а радиус непрерывно растет со временем. Схематически образование воздушной ударной волны (ВУВ) изображено на рис. 5.1.

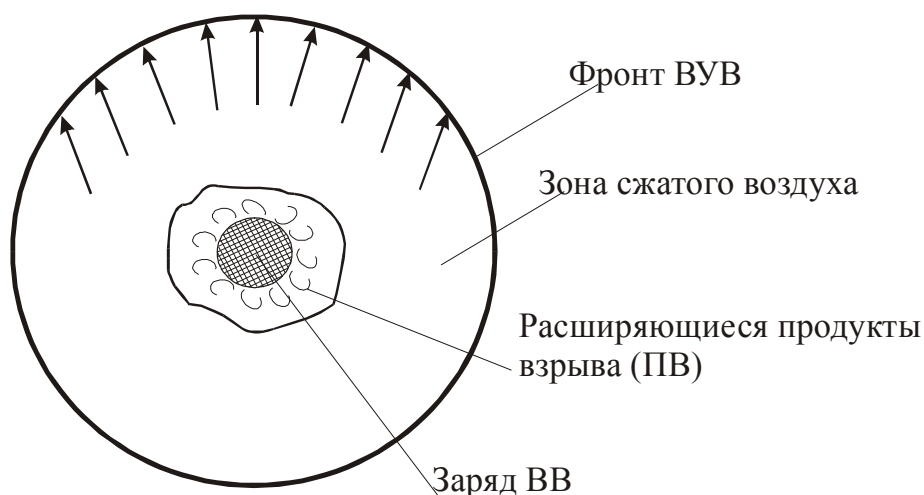


Рис. 5.1. Схема образования воздушной ударной волны (ВУВ)

Допустим, что в неограниченной воздушной среде находится заряд ВВ. При взрыве этого заряда ВВ переходит в газообразные продукты детонации, которые в первый момент времени занимают объем заряда, находясь под весьма высоким давлением 15...30 тыс. МПа или 150...300 тыс. кг/см². Так как давление в окружающей воздушной среде во много раз меньше давления продуктов детонации, то последние, расширяясь, наносят резкий удар по прилегающим слоям. За счет этого воздух сжимается, резко поднимается его давление, увеличиваются плотность и температура. Можно с некоторым приближением считать, что продукты взрыва (ПВ) расширяются подобно сильно сжатой и мгновенно освобожденной пружине.

Масса ПВ, расширяясь, вытесняет окружающий воздух и образует вокруг себя зону сжатого воздуха. Это зона воздействует на окружающий, еще не возмущенный воздух и сжимает его. Таким образом, сжатие передается все дальше и дальше от места взрыва (см. рис. 5.1).

Внешняя граница сжатого слоя воздуха представляет собой фронт воздушной ударной волны, перемещающийся со сверхзвуковой скоростью от места взрыва. Таким образом, при расширении ПВ они встречают и вытесняют воздух, окружающий заряд. Если воздух имеет давление, близкое к нормальному (взрыв произошел на небольшой высоте), то можно считать, что плотность воздуха в 1200...1500 раз меньше плотности ПВ. Плотность воздуха при нормальных условиях ($t = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$, $p = 101325\text{ Па}$) равна $1,293\text{ кг/м}^3$; плотность тротила – 1600 кг/м^3 , плотность октогена – 1900 кг/м^3 . Поэтому масса воздуха, равная массе заряда должна содержаться в объеме, равном примерно 1200...1500 объема заряда, или в шаре, имеющем радиус (табл. 5.1):

$$R_k \approx (11...12), r_0,$$

где R_k – критическое расстояние; r_0 – радиус заряда, приведенного к сферической форме, м;

$$r_0 = 0,053\sqrt[3]{m},$$

где m – масса заряда ВВ, кг

Таблица 5.1

Соотношение величин r_0 , m и R_k

m , кг	r_0 , м	R_k , м
1	0,05	0,6
10	0,11	1,3
100	0,23	2,7
1000	0,53	6,3

При взрыве в воздухе на расстоянии R_k масса ПВ вытесняет во все стороны равную себе массу воздуха. Этого оказывается достаточно, чтобы затормозить расширяющиеся ПВ и расстроить их направление струи. На расстоянии, близком к R_k , давление ПВ достигает иногда атмосферного. К этому моменту взрывная волна отрывается от поверхности облака взрывных газов и самостоятельно распространяется далее в окружающей среде. Распространяющаяся ударная волна вовлекает в движение все больше частиц среды. При этом амплитуда волны уменьшается с расстоянием, в связи с чем уменьшается разрушительное действие. Таким образом, ПВ отдают часть своей энергии окружающей среде, в которой образуется ударная волна, обладающая разрушительным действием на значительных расстоя-

ниях, многократно превышающих R_k . При взрывах больших зарядов именно ударная волна производит разрушение на значительных расстояниях. Другими словами – **воздушная ударная волна** – это область сильно сжатого воздуха, перемещающегося во все стороны от центра взрыва со сверхзвуковой скоростью. Характерной особенностью ударной волны является движущийся за ней поток воздушной среды, направленный с той же скоростью в ту же сторону.

На рис. 5.2 показана типичная кривая изменения давления во времени в некоторой точке пространства при прохождении ударной волны, вызванной взрывом. В момент прихода ударной волны τ_0 в данную точку пространства давление скачком повышается до давления P_1 на величину ΔP . Этот скачок давления происходит мгновенно и поэтому является чрезвычайно резким. За фронтом ударной волны давление быстро падает и к моменту времени τ_1 становится равным P_0 . Промежуток времени между τ_0 и τ_1 называется **фазой сжатия**. За этой фазой следует фаза разряжения, в которой давление среды в данной точке пространства становится ниже P_0 , а затем вновь возрастает до P_0 .

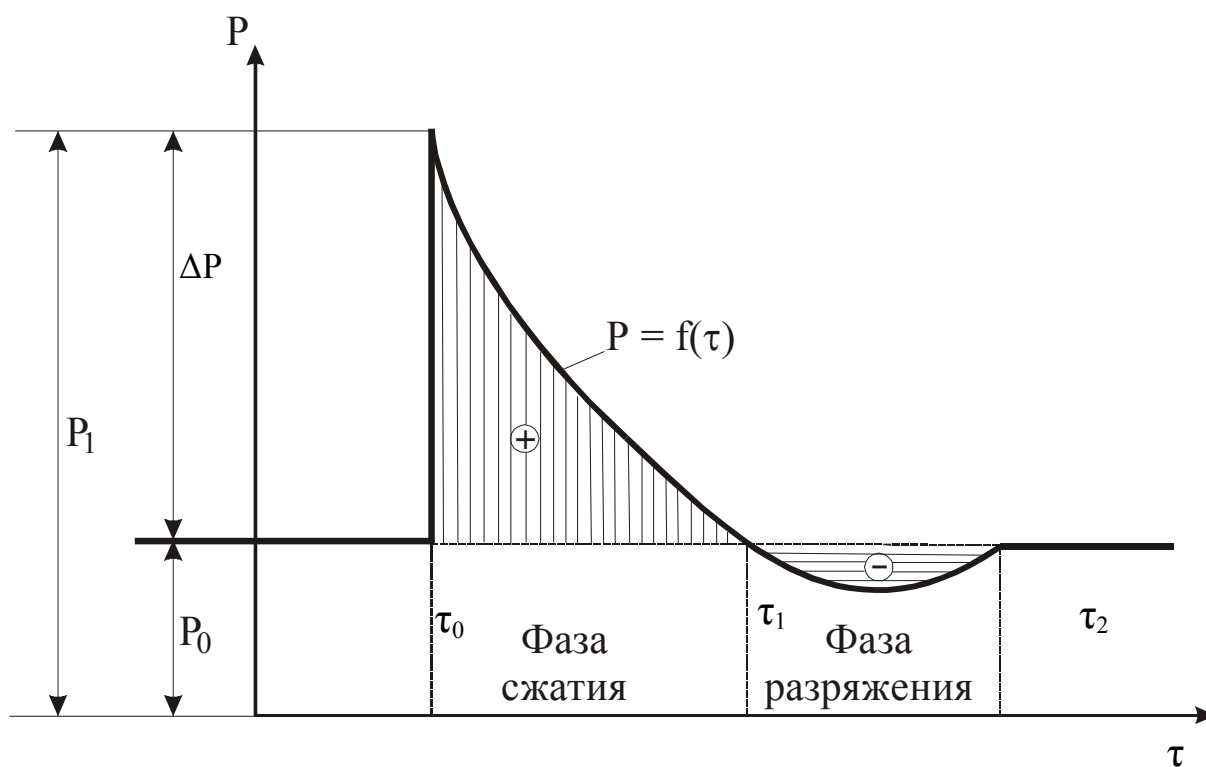


Рис. 5.2. Изменение давления во времени при прохождении ударной волны взрыва

Давление $\Delta P = P_1 - P_0$ называется избыточным. Именно от его величины зависит характер разрушительного действия ударной волны.

A schematic diagram of a 1D lattice with N sites. The lattice is represented by a horizontal line with N vertical tick marks. The sites are labeled $1, 2, \dots, N$ from left to right. A double-headed arrow above the line indicates the total length L . A single-headed arrow below the line indicates the distance between adjacent sites, labeled $1/N$.



93

Для того чтобы движущийся поршень мог создать ударную волну, скорость его должна быть достаточно большой, но не обязательно сверхзвуковой.

Рассмотренная схема образования ударной волны движущимся поршнем может быть применена и к механизму образования ударной волны при взрыве. Сжатые до высокого давления газообразные продукты взрыва играют роль своеобразного поршня, воздействующего на окружающую среду во всех направлениях и вызывающего в ней ударную волну. ПВ – это, по сути, трехмерный поршень, движущийся от центра взрыва к периферии, в начальный момент имеет наибольшую скорость разлета; по мере расширения скорость разлета падает вплоть до нуля, после чего газы получают некоторое перемещение в обратном направлении.

Если скорость поршня будет близка к скорости звука (330 м/с) или меньше ее, то создается ударная волна с параметрами, приведенными в табл. 5.2.

Таблица 5.2

Характеристика опыта с поршнем по образованию ударной волны

Скорость поршня, U , м/с	Создаваемое избыточное давление ΔP , кПа (кг/см^2)	Характер действия реальной ВУВ
330	50...100 (0,5...1)	Разрушение прочных сооружений
50	25 (0,25)	Разрушение легких сооружений (кровля, перегородки)
10	5 (0,05)	Разрушение остекления

В данном случае речь идет об ударной волне, возникшей при движении поршня – необтекаемого тела. Если в воздухе движется хорошо обтекаемое тело (самолет, снаряд, ракета), то значительные скачки давления возникнут лишь при скоростях полета, близких к звуковой.

Скорость распространения ударной волны не является постоянной величиной и зависит от интенсивности скачка давления; как правило, ударная волна распространяется со скоростью, большей скорости звука.

Обычно принимают, что фронт ударной волны представляет собой поверхность, не имеющей толщины. В действительности, благодаря теплопроводности и вязкости воздуха, повышение его параметров происходит в некоторой зоне $\Delta X = 10^{-4} \dots 10^{-5}$ мм. Поэтому считают, что параметры газа изменяются на поверхности фронта волны скачкообразно.

Возникающие при возникновении ударной волны уплотнения среды получаются за счет перемещения части воздуха из слоев, лежащих непосредственно за зоной сжатия, поэтому здесь образуется зона разрежения, в которой давление меньше атмосферного (рис. 5.4).

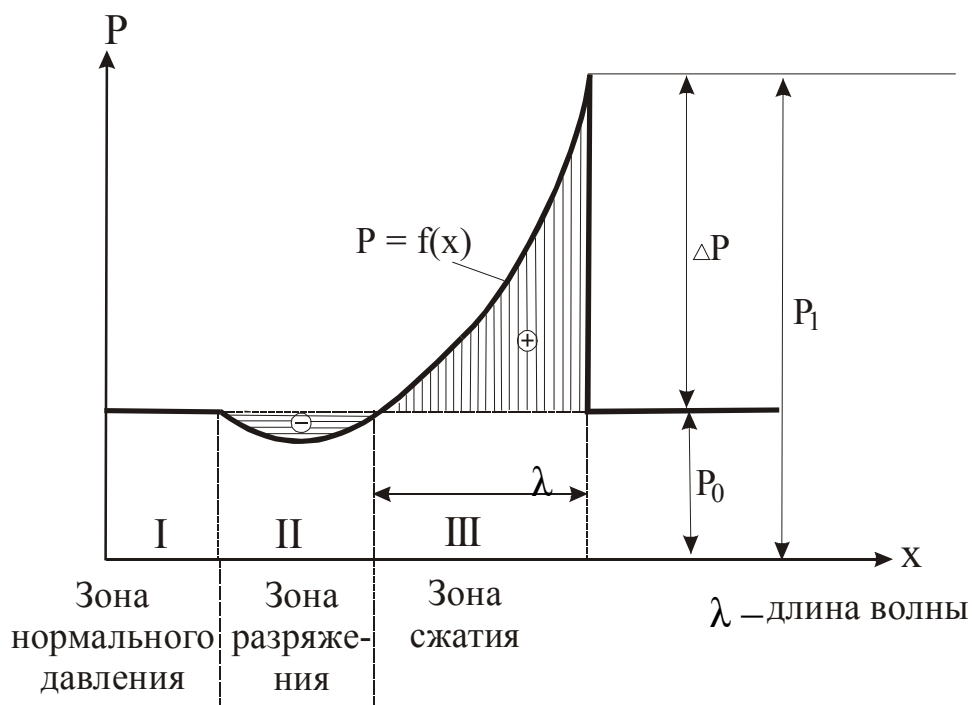


Рис. 5.4. График изменения давления при прохождении ВУВ

При взрыве в воздухе, скорость движения воздушного потока, движущегося за ударной волной, может достигать тем большей величины, чем интенсивнее ударная волна (табл. 5.3).

Таблица 5.3

Скорость движения воздушного потока за фронтом ВУВ

Давление на фронте ВУВ, P_1 , мПа (кг/см ²)	0,1(1) ¹	0,2(2) ¹	1,0(10)	10(100)	50(500)
Скорость движения ВУВ, D_1 , м/с	330	452	978	3020	6750
Скорость движения воздуха за фронтом ВУВ, ω_1 , м/с	0	175	725	2590	5980

Действие взрыва заряда ВВ схематически представлено на рис. 5.5 и 5.6.

В зоне I (зона бризантного действия) разрушение наносится, главным образом, продуктами взрыва. В этой зоне происходит расширение ПВ и образование ВУВ. На границе зоны происходит отрыв ВУВ от ПВ.

В зоне II (зона фугасного действия) разрушения наносятся осколками от корпуса, в который был помещен заряд, различными твердыми предметами, отброшенными при взрыве с большой скоростью. Здесь волна обла-

дает большой интенсивностью, обеспечивающей разрушение встречных преград.

В зоне III (зона слабых ударных волн) происходит сверхзвуковое волнообразное движение масс воздуха с тенденцией затухания.

В зоне IV (зона звуковых волн) ударная волна вырождается и переходит в звуковую.

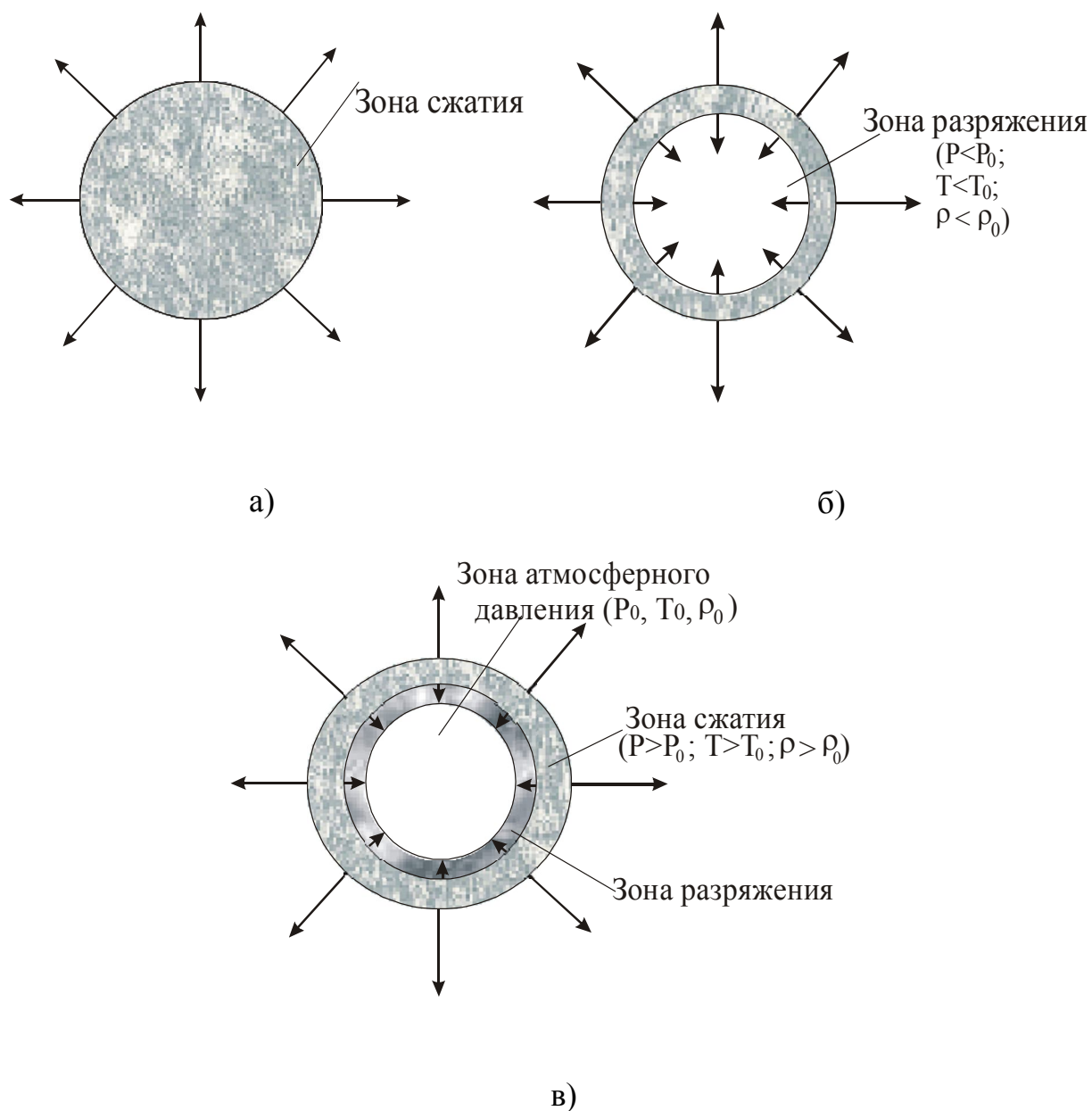


Рис. 5.5. Схема образования ударной волны, зоны сжатия, разрежения, атмосферного давления: а – ударная волна в момент ее образования; б – образование зоны разрежения; в – образование зоны атмосферного давления

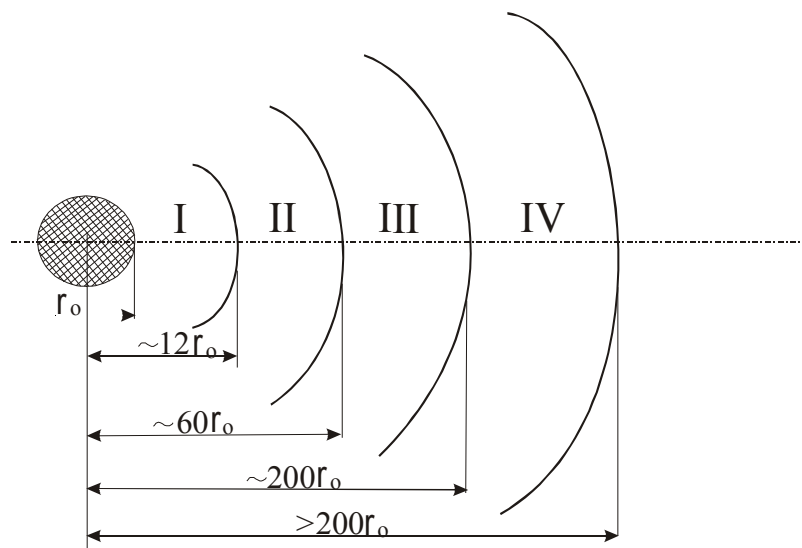


Рис. 5.6. Схема действия взрыва при возникновении и распространении ВУВ

5.2. Параметры воздушной ударной волны (ВУВ)

В инженерной практике наибольший интерес представляет определение следующих параметров ударной волны:

- 1 – давление воздуха на фронте ВУВ, P_1 ;
- 2 – скорость движения фронта ВУВ, D ;
- 3 – скорость движения воздуха за фронтом ВУВ, ω ;
- 4 – плотность воздуха на фронте ВУВ, ρ_1 ;
- 5 – температура воздуха на фронте ВУВ, T_1 .

Параметры среды в невозмущенном воздухе перед фронтом ВУВ:

- 1 – давление воздуха $P_0 = 101\,325$ Па;
- 2 – скорость звука $\alpha_0 = 340$ м/с;
- 3 – скорость невозмущенного потока $\omega_0 = 0$ м/с;
- 4 – плотность воздуха $\rho_0 = 1,225$ кг/м³;
- 5 – температура воздуха $T_0 = 288$ К.

Для определения параметров ВУВ следовало бы составить систему из 5 уравнений, однако задача существенно упрощается, если одну из искомых величин считать известной, например, определить ее значение экспериментально, а все остальные величины выразить через нее.

Из параметров ВУВ удобнее всего при современной технике определить давление P_1 или избыточное давление ΔP_1 .

Для определения давления вблизи центра взрыва могут быть приняты следующие допущения:

- 1 – процесс взрыва адиабатический;
- 2 – продукты детонации расширяются в полой сфере, толщина которой равна длине ВУВ (λ) – толщина зоны сжатия;
- 3 – длина ВУВ λ – постоянна (рис. 5.7).

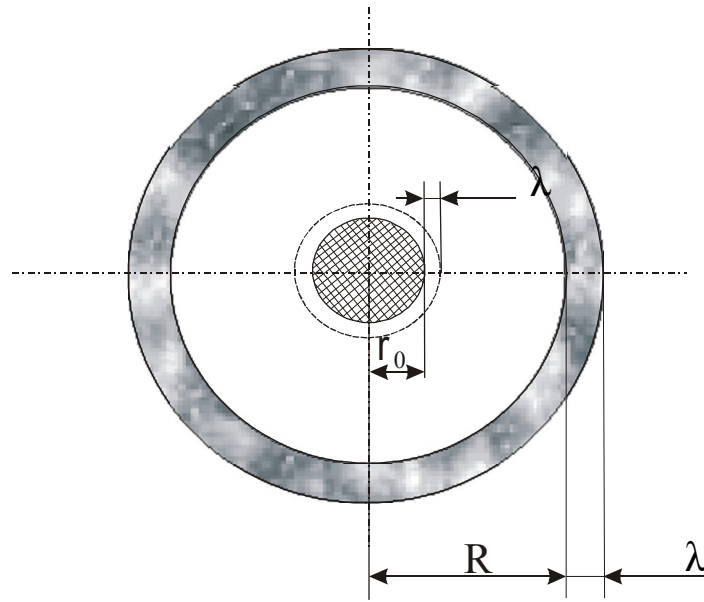


Рис. 5.7. Схема расширения ПВ

В этом случае с учетом обозначений рис. 5.7 можно записать:

$$\frac{P_1}{P_{\text{взр}}} = \left(\frac{V_0}{V} \right)^k,$$

где $V_0 = 4\pi r_0^2 \lambda$; $V = 4\pi R^2 \lambda$.

Подставив данные значения, получим:

$$\frac{P_1}{P_{\text{взр}}} = \left(\frac{r_0}{R} \right)^{2k},$$

отсюда

$$P_1 = P_{\text{взр}} \cdot \left(\frac{r_0}{R} \right)^{2k},$$

где P_1 – давление на фронте ВУВ на расстоянии R от центра взрыва, Па; $P_{\text{взр}}$ – давление ПВ к началу их расширения, Па; K – показатель адиабаты ($k = 1,3$ вместо $1,4$ в обычных условиях).

Результаты расчета давлений на фронте УВ хорошо согласуются с опытными данными на расстоянии до $12r_0$ ($R \leq 12r_0$). При $R > 12r_0$ можно рекомендовать экспериментальную формулу

$$P_{1T} = P_0 + 2,35 \cdot 10^5 \frac{\sqrt[3]{m}}{R}, \text{ Па},$$

где P_{1T} – давление на фронте ВУВ для тротила; $P_0 = 101\,325$ Па; m – масса заряда ВВ, кг; R – расстояние от центра взрыва до УВ, м.

При необходимости определения P_1 для других ВВ необходимо ввести поправку:

$$\Delta = 3\sqrt{\frac{Q}{Q_T}},$$

где Q_T – теплота взрыва тротила; Q – теплота взрыва заданного ВВ.

С учетом поправки формула принимает вид:

$$P_1 = 3\sqrt{\frac{Q}{Q_T}} \cdot P_0 + 2,35 \cdot 10^5 \frac{\sqrt[3]{m}}{R}, \text{ Па.}$$

В табл. 5.4 приведены результаты эксперимента М.А. Садовского и значения давлений, вычисленных по вышеприведенной формуле.

Таблица 5.4

Давление воздуха на фронте УВ вблизи центра взрыва

Масса заряда ВВ, м, кг	Приведенный радиус заряда r_0 , м	Расстояние от центра взрыва R , м	Отношение R/r_0	Давление	
				замер	расчет
				$P_1 \cdot 10^5 \text{ Па (кг/см}^2\text{)}$	
1	0,053	0,75	14,2	285(282)	222(220)
		4,0	75,3	10,1(10)	11,1(11)
25	0,153	1,7	11,0	444(440)	439(435)
130	0,267	5,8	21,7	111(110)	86(85)
250	0,332	8,3	25	74(73)	64(63)

На основе обработки результатов экспериментальных исследований по подрыву массы больше 100 кг М.А. Садовским получена формула для расчета избыточного давления:

$$\Delta P_1 = 0,825 \cdot 10^5 \frac{\sqrt[3]{m}}{R} + 2,645 \cdot 10^5 \frac{\sqrt[3]{m^2}}{R^2} + 6,97 \cdot 10^5 \frac{m}{R^3}, \text{ Па.}$$

Если взрыв произошел не в воздухе, а на поверхности земли, то волна распространяется не в полной сфере, а только в полусфере, в результате этого объем воздуха, занимаемый УВ, уменьшается вдвое. В этом случае происходит такое усиление УВ, которое соответствует удвоенной массе заряда, поэтому формула Садовского М.А. принимает вид:

$$\Delta P_1 = 1,04 \cdot 10^5 \frac{\sqrt[3]{m}}{R} + 4,26 \cdot 10^5 \frac{\sqrt[3]{m^2}}{R^2} + 13,94 \cdot 10^5 \frac{m}{R^3}, \text{ Па.}$$

Формулы Садовского справедливы для тротила. При необходимости определения ΔP_1 для других ВВ можно воспользоваться формулой

$$\Delta P_1 = \Delta P_{1T} \cdot \sqrt[3]{\frac{Q}{Q_T}}.$$

Величины теплоты взрыва тротила Q_T , кДж/кг:

- при плотности заряда $\rho = 1500 \text{ кг/м}^3$, $Q_T = 4232$;
- при плотности заряда $\rho = 850 \text{ кг/м}^3$, $Q_T = 3394$.

Для определения других параметров ВУВ применяется система из 4-х уравнений:

$D \cdot \rho_0 = (D - \omega) \rho_1$ – закон сохранения массы вещества при сжатии;

$\rho_1 - \rho_0 = D \cdot \rho_0 \omega$ – закон сохранения количества движения при сжатии;

$\rho_1 \omega = \rho_0 D \left(\varepsilon_1 - \varepsilon_0 + \frac{\omega^2}{2} \right)$ – закон сохранения энергии при сжатии;

ε_1 и ε_0 – конечная и начальная удельная внутренняя энергия единицы массы сжатого газа;

$\frac{P_1}{\rho_1} = RT$ – закон (уравнение) состояния сжимаемого волной вещества.

Докажем справедливость приведенных уравнений, для чего воспользуемся наиболее простым методом вывода основных соотношений, примененных отечественными учеными Я.Б. Зельдовичем и А.С. Компанейцем.

На рис. 5.8 приведена пояснительная схема к выводу основных уравнений гидродинамической теории.

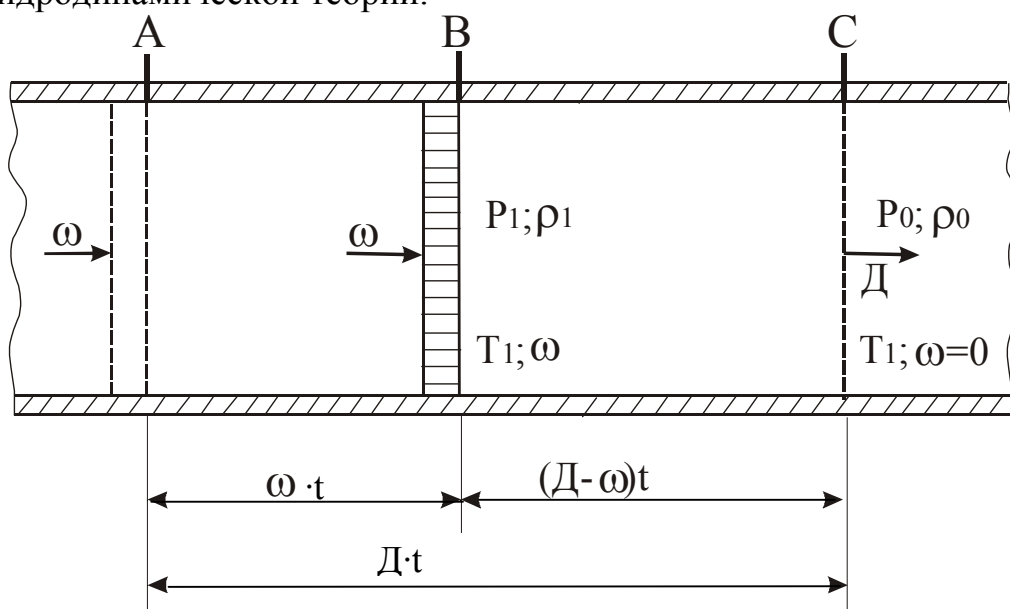


Рис. 5.8. Пояснительная схема к выводу основных уравнений гидродинамической теории

Предположим, что в трубе сечением S , заполненной газом, движется поршень с постоянной скоростью. Под действием поршня в газе возникает УВ – область сжатия, распространяющаяся в невозмущенный газ.

На переднем фронте УВ происходит скачкообразное изменение давления, плотности и температуры газа. Сжатый поршнем газ будет двигаться со скоростью поршня, т. е. со скоростью ω ; фронт ударной волны (передняя граница области сжатия) будет распространяться в невозмущенный газ со скоростью D , большей, чем ω , что в дальнейшем будет обосновано.

Допустим, что в начальный момент поршень находится в плоскости А; через промежуток времени t поршень будет находиться в плоскости В. Фронт ударной волны в начальный момент также находится в плоскости А, а в момент t он находится в плоскости С. Обозначим через P_0 , ρ_0 , T_0 соответственно давление, плотность и температура газа в исходном состоянии, а через P_1 , ρ_1 и T_1 – давление, плотность и температуру газа, сжатого ударной волной. Из рис. 5.8 следует, что если за время t поршень прошел расстояние ωt , то ударная волна прошла расстояние Dt , расстояние же между поршнем и передним фронтом ударной волны стало $(D - \omega) \cdot t$.

Отсюда, объем сжатого газа равен $(D - \omega) \cdot t \cdot S$, а первоначальный объем того же количества газа был $D \cdot t \cdot S$. Масса сжатого газа равна $\rho_1 \cdot (D - \omega) \cdot t \cdot S$, а масса газа перед сжатием $\rho_0 \cdot D \cdot t \cdot S$. Так как в процессе сжатия масса вещества не изменяется, то:

$$\rho_0 \cdot D \cdot t \cdot S = \rho_1 \cdot (D - \omega) \cdot t \cdot S,$$

или

$\rho_0 D = \rho_1 (D - \omega)$ – закон (уравнение) сохранения массы при сжатии (см. выше).

Сжатый газ движется со скоростью ω и, следовательно, при сжатии массы $\rho_0 D \cdot t \cdot S$ приобретает количество движения $\rho_0 D \cdot t \cdot S \cdot \omega$.

По второму закону Ньютона изменение количества движения равно импульсу силы, т. е. произведению силы на время ее действия. Результирующая сила, действующая на газ между поршнем и плоскостью С равна $(P_1 - P_0)S$, а импульс ее за время t равен $(P_1 - P_0)S \cdot t$. Приравнявая изменение количества движения величине импульса, получим:

$$(P_1 - P_0)S t = \rho_0 \cdot D \cdot t \cdot S \cdot \omega,$$

или

$(P_1 - P_0) = \rho_0 \cdot D \cdot \omega$ – закон (уравнение) сохранения количества движения при сжатии газа (см. выше).

Напишем теперь уравнение сохранения энергии при сжатии. Полагаем, что при сжатии газ не отдает и не получает тепла извне, поэтому изменение его полной энергии должно равняться произведенной над газом работе. В свою очередь, полная энергия складывается из внутренней (тепловой) энергии и кинетической энергии движущегося газа. Обозначим через ε_0 и

ε_1 начальную и конечную удельную внутреннюю энергию (т. е. внутреннюю энергию единицы массы); кинетическая энергия единицы массы сжатого газа, очевидно, равна $\frac{\omega^2}{2}$. Так как масса сжатого газа $\rho_0 D \cdot t \cdot S$, то полное изменение энергии газа при сжатии составит:

$$\rho_0 D \cdot t \cdot S \left(\varepsilon_1 - \varepsilon_0 + \frac{\omega^2}{2} \right).$$

Работа внешней силы над газом есть работа поршня, действующего на газ с силой $P_1 S$ на пути ωt . Приравнявая изменение энергии работе силы, получим:

$$\rho_0 D \cdot t \cdot S \left(\varepsilon_1 - \varepsilon_0 + \frac{\omega^2}{2} \right) = P_1 S \omega t,$$

или

$$\rho_0 D \left(\varepsilon_1 - \varepsilon_0 + \frac{\omega^2}{2} \right) = P_1 \omega - \text{закон (уравнение) сохранения энергии при сжатии.}$$

Присоединяя к трем написанным уравнениям сохранения массы, количества движения и энергии уравнение состояния сжимаемого газа, можно определить любую из пяти величин P , ρ , T , ω и D , если одна из них задана и известны исходные параметры газа P_0 , ρ_0 и T_0 .

Ниже приводятся системы уравнений для определения параметров воздушной ударной волны (ВУВ) для значений невозмущенного воздуха, соответствующие международной стандартной атмосфере $T_0 = 288$ К, $P_0 = 101\,325$ Па, $\rho_0 = 1,225$ кг/м³:

$$D = 0,404 \sqrt{6P_1 - P_0}, \text{ м/с};$$

$$\omega = \frac{P_1 - P_0}{1,2P_1 + 2P_0} \cdot D, \text{ м/с};$$

$$\rho_1 = \rho_0 \frac{6P_1 + P_0}{P_1 + 6P_0}, \text{ кг/м}^3;$$

$$T_1 = T_0 \frac{P_1}{P_0} \cdot \left(\frac{P_1 + 6P_0}{6P_1 + P_0} \right), \text{ К.}$$

Формулы системы уравнений пригодны для расчета параметров ВУВ средней интенсивности при $P_1 \leq 5$ МПа и представляют практический интерес. При больших значениях давлений необходимо учитывать зависимость теплоемкости C_V от T и показателя адиабаты. С повышением температуры повышается C_V и снижается показатель адиабаты (табл. 5.5).

Таблица 5.5

Параметры ВУВ

Давление P_1 , МПа	Избыточное давление ΔP_1 , МПа	Скорость D , м/с	Скорость ω , м/с	Плотность ρ , кг/м ³	Температура T , К
5,100	5,000	2200	1800	6,600	2200
1,100	1,000	1040	772	4,800	490
0,200	0,100	460	22,6	1,300	296
0,101	0,001	340	2,3	1,225	228

5.3. Отражение ВУВ от прочных преград

Мы рассматривали распространение ВУВ или в свободном воздухе или вдоль поверхности (беспрепятственно). На практике весьма часто УВ наталкивается на различного рода препятствия. Характер ее действия при этом меняется: давление и импульс, сообщаемые препятствию, увеличивается по сравнению с импульсом свободно распространяющейся ударной волны.

На рис. 5.9 показаны графики распределения давления в зависимости от расстояния при отражении ударной волны.

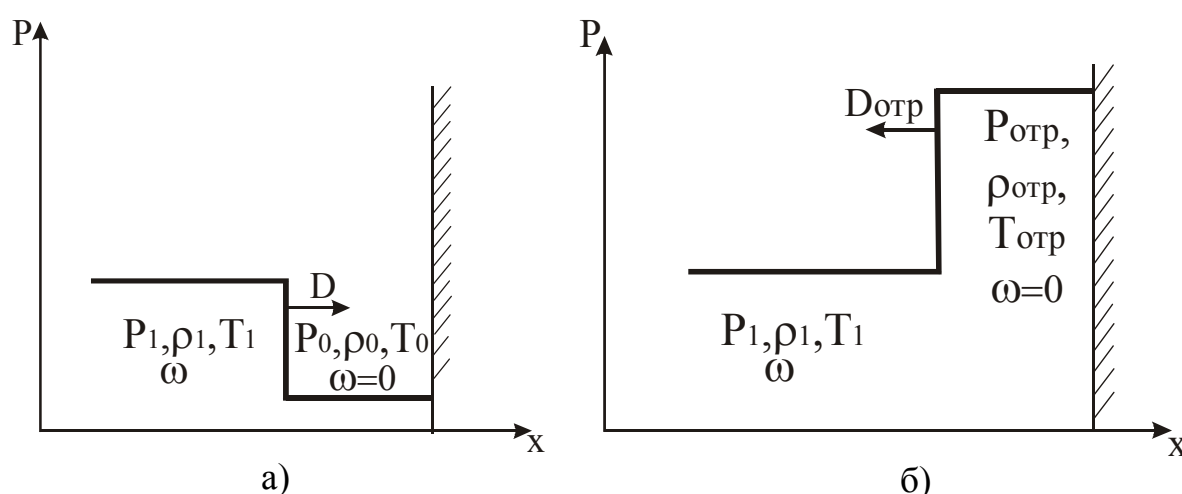


Рис. 5.9. Схема отражения УВ от препятствия: а – распределение давлений в пространстве в момент, предшествующий подходу фронта к препятствию; б – то же, после отражения волны от препятствия

Для упрощения предполагаем, что подходящая к стенке УВ имеет за фронтом постоянные значения: давления P_1 , плотности ρ_1 , температуры T_1 , скорости потока ω . В момент, когда УВ натолкнется на стенку, ее передний слой затормозится и скорость потока в этом слое станет равной нулю. За счет этого торможения произойдет дополнительное повышение давления до значения $P_{отр}$. При этом на преграду внезапно начинает действовать давление состоящее из двух частей:

- давление воздуха на фронте УВ (P_1);
- давление, обусловленное обстановкой движущихся за фронтом УВ слоев сжатого воздуха.

Первое слагаемое принято называть *статическим давлением*, а второе, – представляющее собой по существу давление скоростного напора движущихся сжатых слоев воздуха, называют *динамическим*. Оно вызвано тем, что при резком торможении преградой движущихся масс воздуха энергия их движения переходит в энергию давления, и по идущей (падающей) волне в направлении, противоположном ее движению (т. е. от стенки), пойдет волна дополнительного поджатия, которую обычно называют *отраженной волной* (см. рис. 5.9, б).

Применяя к границе между идущей и отраженной волной законы сохранения вещества, количества движения и энергии, а также учитывая, что в отраженной волне $\omega = 0$, можно вычислить $P_{отр}$, $\rho_{отр}$, $T_{отр}$ и $D_{отр}$ – скорость, с которой распространяется граница дополнительного поджатия (табл. 5.6).

Таблица 5.6

Соотношение избыточных давлений на фронте падающей и отраженной ВУВ

ΔP_1 , кг/см ²	$\Delta P_{отр}$, кг/см ²	ΔP_1 , кг/см ²	$\Delta P_{отр}$, кг/см ²	ΔP_1 , кг/см ²	$\Delta P_{отр}$, кг/см ²
0,1	0,21	0,7	1,78	2,5	8,45
0,2	0,43	0,8	2,10	3,0	11,4
0,3	0,67	1,0	2,75	4,0	16,7
0,4	0,93	1,2	3,45	5,0	22,5
0,5	1,20	1,5	4,59	7,0	35,0
0,6	1,40	2,0	6,67	10,0	55,0

Приведем без вывода выражение избыточного давления отражения $\Delta P_{отр}$, поскольку именно эта величина наиболее важна для оценки разрушающего действия:

$$\Delta P_{отр} = (\Delta P_1 + \rho_0) \frac{\frac{3K-1}{K-1}(\Delta P_1 + P_0) - P_0}{(\Delta P_1 + P_0) + \frac{K+1}{K-1} \cdot P_0},$$

где ΔP_1 – избыточное давление на фронте идущей волны.

Полагая $P_0 = 1$ кг/см² и $K = 1,4$, получим:

$$\Delta P_{отр} = (\Delta P_1 + 1) \frac{8\Delta P_1 + 7}{\Delta P_1 + 7} - 1.$$

Для весьма сильных ударных волн, когда ΔP_1 намного больше P_0 :

$$\Delta P_{\text{отр}} \approx 8\Delta P_1.$$

Если учесть, что для весьма сильных ударных волн значение K = снижается, то в пределе:

$$\Delta P_{\text{отр}} = (10 \div 11)\Delta P_1.$$

Рассмотренные выше условия определения основных параметров ВУВ идеализированы. При расчетах были сделаны следующие упрощающие допущения.

1. Предполагалось, что отражается ударная волна с постоянными значениями P_1 , ρ_1 , T_1 за фронтом; у реальных волн параметры за фронтом быстро падают.

2. Предполагалось, что направление распространения УВ является нормально к поверхности препятствия; в действительности падение волны может происходить под разными углами к отражающей поверхности.

3. Предполагалось, что отражающая плоскость имеет неограниченные размеры; в действительности преграды имеют конечные размеры, часто меньше, чем длина самой УВ.

Поэтому есть соответствующие методики расчета параметров ударных и отраженных волн с тем или иным приближением к реальным условиям [6]. Вопросы взаимодействия УВ с препятствиями имеют большое научное и практическое значение. В этой связи необходимо заострить внимание, что в зависимости от условий и обстановки разрушение может определяться следующими факторами:

1) избыточным давлением на фронте, импульсом (или некоторой частью импульса) *идущей УВ*;

2) избыточным давлением на фронте, импульсом или частью импульса *отраженной УВ*;

3) давлением, импульсом или некоторой частью *импульса обтекания*;

4) *скоростным напором* или импульсом скоростного напора (или некоторой его частью).

В усложненных условиях взаимодействия УВ с препятствиями теоретический расчет чрезвычайно затруднен. Поэтому придается большое значение полученной достоверной экспериментальной записи $P = f(t)$.

5.4. Условия на фронте ударной волны

При переходе через ударную волну должны выполняться общих законов сохранения массы, импульса и энергии. Соответствующие условия на поверхности волны – непрерывность потока вещества, потока импульса и потока энергии:

$$\rho_0 u_0 = \rho_1 u_1,$$

$$p_0 + \rho_0 u_0^2 = p_1 + \rho_1 u_1^2,$$

$$h_0 + \frac{u_0^2}{2} = h_1 + \frac{u_1^2}{2}$$

где ρ – плотность, u – скорость, p – давление, h – энтальпия, теплосодержание газа.

Индексом «0» отмечены параметры газа перед ударной волной, индексом «1» – за ней. Эти условия носят название условий Ренкина – Гюгонио, поскольку первыми из опубликованных работ, где были сформулированы эти условия, считаются работы британского инженера Вильяма Ренкина (1870) и французского баллистика Пьера Анри Гюгонио (1889 г).

Условия Ренкина – Гюгонио позволяют получить давление и плотность за фронтом ударной волны в зависимости от начальных данных (интенсивности ударной волны, давления и плотности перед ней):

$$h_0 - h_1 + \frac{1}{2} \left(\frac{1}{\rho_0} + \frac{1}{\rho_1} \right) (p_1 - p_0) = 0,$$

где h – энтальпия газа (функция ρ и p). Эта зависимость носит название адиабаты Гюгонио, или ударной адиабаты (рис. 5.10).

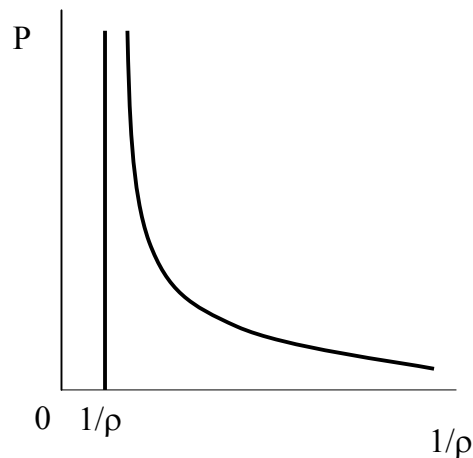


Рис. 5.10. Адиабата Гюгонио

Кривая Гюгонио, при заданных параметрах невозмущенной среды, однозначно определяет конечное состояние среды за фронтом ударной волны, но не характеризует последовательные изменения состояния в переходной зоне. При изучении же промежуточных состояний среды в этой зоне необходимо учитывать силы вязкости и теплопроводность.

Фиксируя на адиабате точку, соответствующую начальному состоянию перед ударной волной, получаем все возможные состояния за волной заданной интенсивности. Состояниям за скачками сжатия отвечают точки адиабаты, расположенные левее выбранной начальной точки, за скачками разрежения – правее.

Анализ адиабаты Гюгонио показывает, что давление, температура и скорость газа после прохождения скачка сжатия неограниченно возрастают при увеличении интенсивности скачка. В это же время плотность возрастает лишь в конечное число раз, сколь бы ни была велика интенсивность скачка. Количественно увеличение плотности зависит от молекулярных свойств среды. При уменьшении амплитуды УВ она вырождается в слабый (звуковой) сигнал.

Из условий Ренкина – Гюгонио также можно получить уравнение прямой в плоскости $\frac{1}{\rho}$, называемой прямой Рэлея – Михельсона.

$$\left(\frac{1}{\rho_0} - \frac{1}{\rho_1} \right) (p_1 - p_0) = \text{const} = \rho_0 u_0.$$

Угол наклона прямой определяется значением скорости газа перед ударной волной u_0 , сечение адиабаты Гюгонио этой прямой дает параметры газа за фронтом ударной волны. Михельсон ввел это уравнение при исследовании воспламенения гремучих газовых смесей в 1890 г, работы британца лорда Рэлея по теории ударных волн относятся к 1910 г.

5.5. Регулярное и маховское отражение волн

В зависимости от угла падения ударной волны на препятствие волна может отражаться непосредственно на поверхности препятствия или на некотором расстоянии от него. Во втором случае отражение называется трехволновым, поскольку в этом случае возникает третья ударная волна, соединяющая падающую и отраженную волны с поверхностью препятствия.

Впервые зафиксированное австрийским ученым Эрнстом Махом трехволновое отражение получило также название маховского, для отличия от двухфронтного (или регулярного) отражения.

Выполненный Махом эксперимент, позволивший обнаружить трехволновой режим отражения, заключался в следующем (рис. 5.11, 5.12): в двух точках, расположенных на некотором расстоянии друг от друга, одновременно проскакивали две искры, порождавшие две сферических ударных волны.

Распространяясь над поверхностью, зачерненной сажей, эти волны оставляли отчетливый след точек их пересечения, начинающийся посередине между точками инициализации волн, а затем идущий по срединному перпендикуляру отрезка, соединяющего эти точки инициализации. Далее отрезок на концах разделялся на две симметрично расходящиеся линии.

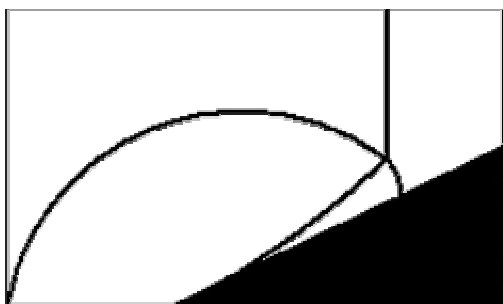


Рис. 5.11. Маховское отражение ударной волны

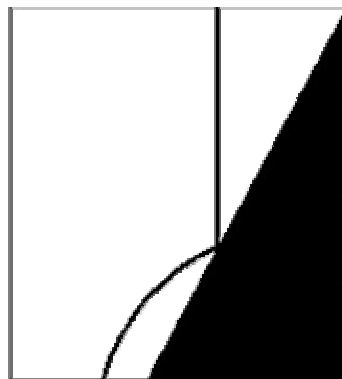


Рис. 5.12. Регулярное отражение ударной волны

Полученная картина соответствует тому, что на ранней стадии взаимодействия ударные волны отражаются друг от друга так, как будто происходит отражение в регулярном режиме от воображаемой плоскости, расположенной посередине между точками инициализации волн. Затем образуется скачок Маха, соединяющий соответствующие точки кривых, приведенных на рис. 5.11.

Сходящаяся ударная волна. Впервые задача о фокусировке ударной волны была сформулирована и решена Г. Гудерлеем в Германии (1942 г.) и независимо Л.Д. Ландау и К.П. Станюковичем в СССР (опубликовано в 1955 г.). По мере приближения волны к центру фокусировки происходит концентрация энергии и ударная волна усиливается. В моменты, близкие к фокусировке, волна выходит на некоторый предельный (называемый автомоделным) режим, когда предшествующие условия создания и распространения ударной волны не важны. Сходящиеся ударные волны позволяют получать гигантские давления и температуры в точке фокусировки, в настоящее время изучение таких волн – одно из перспективных направлений создания управляемого термоядерного синтеза.

Устойчивость ударной волны. Если условия течения таковы, что его малые возмущения имеют тенденцию к росту, то со временем рост этих возмущений может привести к изменению режима течения или даже к полному его разрушению. Исследованиями были определены области устойчивости (затухание возмущений) и неустойчивости (рост возмущений), нейтральной устойчивости (ударная волна не реагирует на возмущения), а также обнаружена область спонтанного излучения звука поверхностью ударной волны. Простые расчеты, основанные на полученных результатах, показали, что в воздухе ударная волна абсолютно устойчива. Вместе с тем, неустойчивость проявляется, например, у детонационных волн, что приводит к особенностям распространения волн такого рода: галолирующая и спиновая детонация, ячеистая структура детонационных волн.

Тенденция даже слабых волн сжатия к опрокидыванию приводит к тому, что звуковые волны переходят в слабые скачки и более уже не распространяются со звуковой скоростью – скорость слабого скачка равна полусумме скоростей звука в среде до скачка и после него. В этом сложность экспериментального определения точной скорости звука. Теория дает следующие результаты – в воздухе (при нормальных условиях) 332 м/с, в воде (при 15 °С) 1490 м/с.

Число Маха. Отношение скорости течения к скорости звука – важная характеристика течения и носит название *числа Маха*:

$$M = \frac{u}{a},$$

где u – скорость газа, a – скорость звука.

При сверхзвуковом течении число Маха больше единицы, при дозвуковом – меньше единицы, при течении со звуковой скоростью – равно единице.

Предложил название «число Маха» швейцарский ученый Якоб Аккерет в знак признания заслуг Э. Маха в области исследования сверхзвуковых течений.

Угол Маха. Для источника слабых возмущений, обтекаемого сверхзвуковым потоком, наблюдается следующее явление: четко выраженные границы поля возмущений – линии Маха (рис. 5.13). При этом синус образованного линией Маха и направлением основного течения угла есть обратное число Маха:

$$\sin \alpha = \frac{a}{u} = \frac{1}{M}.$$

Так как скорость распространения слабых возмущений поперек направления набегающего потока есть скорость звука, то чем больше скорость набегающего потока, тем уже делается угол Маха.

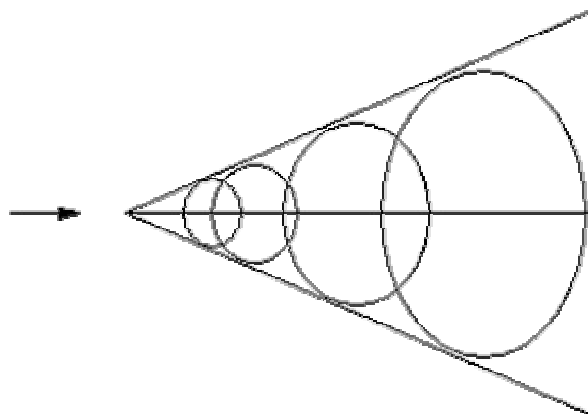


Рис. 5.13. Линии Маха

В отличие от звуковых волн, ударные волны характеризуются следующими особенностями:

- 1) скорость распространения ударных волн всегда больше скорости звука в невозмущенной среде;
- 2) во фронте ударной волны параметры состояния и движения среды изменяются скачком;
- 3) ударные волны сопровождаются перемещением среды в направлении распространения фронта возмущения;
- 4) скорость ударной волны зависит от ее интенсивности, что не наблюдается для звуковых волн;
- 5) при образовании ударных волн энтропия среды возрастает, т. е. $dS_2 > 0$;
- 6) ударная волна не имеет периодического характера, а распространяется в виде одиночного скачка уплотнения.

5.6. Плоская прямая ударная волна

Весьма важное значение в теории ударных волн имеет адиабата Гюгонио, устанавливающая связь между параметрами среды до и после прохождения через нее скачка уплотнения. Изобразив эту связь в виде диаграммы в координатах p , v , получаем так называемую кривую Гюгонио (рис. 5.14). Используя эту диаграмму, можно в простой и наглядной форме исследовать некоторые особенности ударных волн.

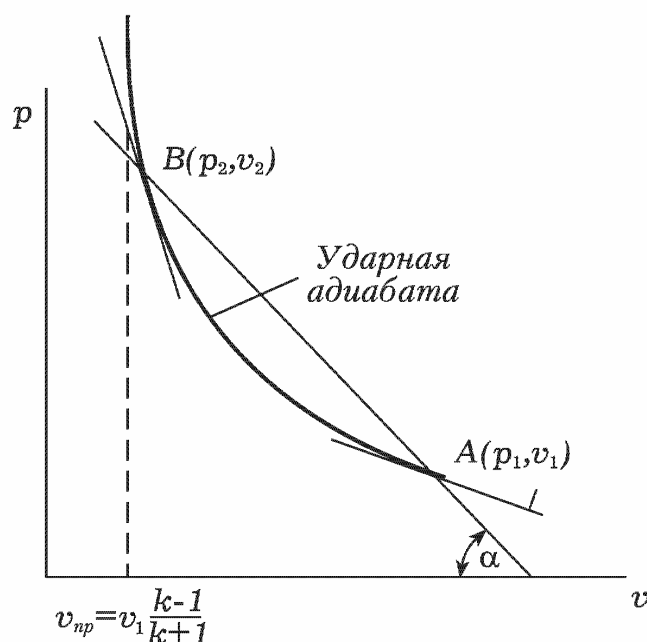


Рис. 5.14. Кривая Гюгонио (ударная адиабата)

Проведем через точку $A(p_1, v_1)$, характеризующую состояние невозмущенной среды, и точку $B(p_2, v_2)$, характеризующую состояние среды, сжатой ударной волной, прямую. Очевидно, что $(p_2 - p_1)/(v_1 - v_2) = \tan \alpha$, где α — угол наклона этой прямой к оси абсцисс. Таким образом, очевидно, что ве-

личины D и u целиком определяются углом наклона α . Все точки на кривой Гюгонио, лежащие выше точки A , соответствуют ударной волне, так как для них $D > c_1$ и $u > 0$; для ветви же кривой, лежащей ниже точки A , $(p_2 - p_1) < 0$ и $(v_1 - v_2) < 0$, т. е. $D > 0$ и $u < 0$. Это означает, что среда будет перемещаться в сторону, противоположную распространению возмущения, и мы будем иметь волну разрежения.

Для слабых ударных волн в пределе, когда $p_2 \rightarrow p_1$ и $v_2 \rightarrow v_1$, $D = v_1 \sqrt{\tan \alpha} = v_1 \sqrt{-dp/dV}$, т. е. адиабата Гюгонио переходит в адиабату Пуассона и имеет в точке A с ней общую касательную. При переходе по адиабате Гюгонио из точки A в точку B энтропия среды возрастает (см. рис. 5.14).

Адиабата Гюгонио выражает закон сохранения энергии и справедлива для ударных волн в политропических средах.

5.7. Явление детонации. Гидродинамическая теория детонации. Детонационная волна

Характерными для ВВ являются два основных вида реакции: горение и детонация, объединяемые общим названием – «взрывчатое превращение». Начальная стадия такого превращения, как правило, представляет собой **мономолекулярную реакцию**. Когда отвод тепла реакции затруднен, возникает саморазогрев ВВ и медленное превращение самоускорения переходит в горение и детонацию. Такому переходу благоприятствует также накопление в ВВ конечных или промежуточных продуктов его распада, которые в большинстве случаев ускоряют реакции разложения. Характерной чертой самораспространяющегося взрывчатого превращения является его макронеоднородность: в каждый момент реакция быстро идет лишь в узкой зоне, отделяющей ее продукты от исходного вещества. За счет передачи энергии соседним непрореагировавшим слоям ВВ в них возбуждается интенсивное химическое превращение. Таким образом, зона реакции распространяется по массе ВВ. Расстояние, на которое перемещается фронт реакции в единицу времени, называют **скоростью взрывчатого превращения**.

Два основных режима взрывчатого превращения – горение и детонация – отличаются, прежде всего, по механизму передачи энергии реакции от слоя к слою. В случае детонации существенную роль в передаче энергии реакции играет распространение по ВВ резкого скачка давления – ударной волны; скорость распространения (скорость детонации) составляет несколько километров в секунду и практически не зависит от внешних условий. Благодаря огромной скорости превращения, образующиеся газы не успевают существенно расшириться за время реакции и в зоне реакции, независимо от наличия прочной оболочки, возникают очень высокие давления (десятки и сотни тысяч кг/см²); по окружающей среде производится сильнейший удар, способный вблизи от заряда разрушить самые прочные материа-

лы. Скорость детонации меняется в некоторых пределах с изменением размеров заряда и плотности ВВ. Если наименьший размер заряда (например, диаметр удлиненного цилиндра) меньше критического значения, то ВВ, сжатое во фронте ударной волны, разбрасывается раньше, чем завершится химическая реакция и устойчивое распространение детонации невозможно. Критический диаметр, величина которого позволяет оценить скорость реакции при детонации, составляет для разных ВВ от долей мм до десятков см. С увеличением диаметра заряда выше критического скорость детонации растет до некоторого предела.

Переходу горения в детонацию благоприятствуют рост давления и температуры ВВ, увеличение поверхности горения за счет проникновения продуктов горения вглубь порошкообразного вещества или турбулизации фронта горения жидкости.

Катастрофические взрывы в угольных шахтах в конце XIX-го столетия побудили ученых ряда стран заняться детальным исследованием распространения пламени в трубах. Одним из наиболее важных результатов этих работ было открытие в 1881 г. четырьмя французскими учеными (Малляром и Ле-Шателье и, независимо от них, Бертло и Вьелем) явления детонации в газах – распространения горения с равномерной, вполне определенной для каждого горючего состава, сверхзвуковой скоростью порядка 2–3 км/с. Этот быстрый процесс горения был назван «фальшивым горением», или детонацией (от французского *detonner*: фальшивить, звучать не в тон). Уже первые исследователи заинтересовались вопросом: какой физический процесс продвигает горение со столь большой скоростью? Теплопроводность и диффузия, обуславливающие распространение медленного пламени, не могли объяснить сверхзвуковых скоростей детонации.

Первая математическая модель детонационной волны в газах, опирающаяся на теорию ударных волн, была разработана на рубеже XIX-XX веков. основополагающие идеи в развитии представлений о сущности и законах распространения детонации изложены в трудах Михельсона, Чепмена, Жуге, ставших классическими и заложивших основы так называемой гидродинамической теории детонации. На первом этапе ее формирования приоритет в анализе этого явления принадлежал русскому ученому В.А. Михельсону, который, в качестве основного отличия самоустанавливающейся детонационной волны от ударной, определил постоянство скорости ее распространения.

Согласно Чепмену (1899 г.), скорость распространения взрывных волн является минимально возможной, а состояния за их фронтами по условию Жуге обладают тем замечательным свойством, что скорость звука в продуктах детонации в точности равна скорости стационарной детонации относительно этих продуктов. Появление новых экспериментальных данных, которые не укладывались в рамки классической теории, привело к необходимости более детального теоретического изучения структуры фронта и механизма распространения газовой детонации.

В 1940 г. Я.Б. Зельдовичем была предложена физическая модель фронта детонации и дана четкая связь между условиями протекания реакции и принципом минимума скорости детонации.

Детальное изучение проблемы газовой детонации позволило обнаружить, что фронт реальной детонационной волны обладает сложной ячеистой структурой. Идеализированная одномерная модель с гладким фронтом оказалась неустойчивой в случае реальных химических реакций, которые обладают сильной зависимостью от температуры. Тем не менее, современная гидродинамическая теория не только правильно объясняет качественные особенности детонационных процессов, но и дает возможность вполне удовлетворительно рассчитать все основные параметры (скорость, давление, плотность, температура, энергия) детонационной волны.

Согласно гидродинамической теории, передача детонации обусловлена распространением по ВВ ударной волны. Если амплитуда во фронте этой волны больше некоторой величины, то волна при своем распространении способна возбуждать за своим фронтом интенсивную химическую реакцию, за счет энергии которой поддерживается постоянство параметров волны и стационарный характер детонационного процесса в целом.

Движение обычной ударной волны складывается из движения скачка уплотнения и перемещения самой среды. Детонационная волна обладает более сложной структурой; распространение последней обуславливается движением ударной волны, зоны химической реакции и конечных продуктов реакции (ПВ).

Поверхность, разделяющая зону химической реакции и продуктов детонации (ПД) при стационарной детонации, называется поверхностью Чепмена–Жуге (Н–Н на рис. 5.15). Параметры ПД на этой поверхности называются параметрами детонационной волны или параметрами Чепмена–Жуге (параметрами в точке Жуге).

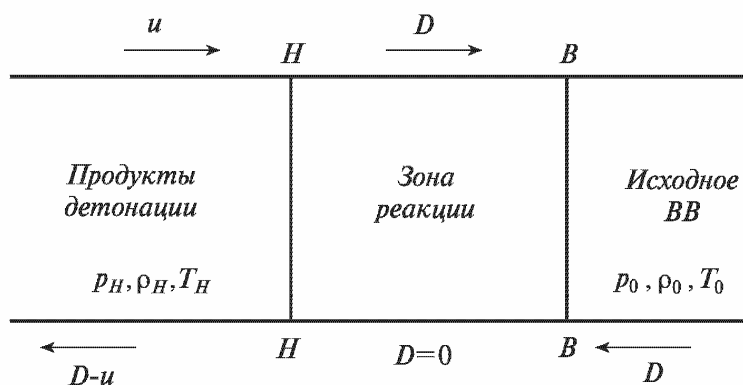


Рис. 5.15. Параметры детонационной волны

Исходное ВВ отделяется от зоны химической реакции фронтом ударной волны (В–В на рис. 5.15). Все параметры Чепмена–Жуге отмечены индексом «Н».

Для описания стационарного процесса детонации, достаточно сопоставить состояние исходного вещества и конечных продуктов реакции. Сама зона реакции может не рассматриваться. В системе координат, связанной с фронтом и движущейся со скоростью D в сторону, противоположную распространению детонации, эта зона остается неподвижной.

Для определения параметров детонационных волн можно воспользоваться основными уравнениями теории ударных волн. Введем следующие обозначения: D – скорость детонации, равная скорости перемещения зоны химической реакции, u_H – скорость продуктов детонации за фронтом волны, p_H , ρ_H , T_H – параметры состояния за зоной химической реакции, p_0 , ρ_0 , T_0 – параметры состояния перед зоной химической реакции, $v_0=1/\rho_0$, $v_H=1/\rho_H$ – удельный объем исходного ВВ (перед зоной химической реакции) и продуктов его взрывчатого превращения за зоной химической реакции.

При переходе от ударных волн к детонационным, основные уравнения сохранения остаются в силе, поэтому можно написать:

$$u_H = (v_0 - v_H) \sqrt{\frac{p_H - p_0}{v_0 - v_H}},$$

$$D = v_0 \sqrt{\frac{p_H - p_0}{v_0 - v_H}}.$$

Так как для детонационных процессов $D = \text{const}$, то последнее уравнение в переменных p и v дает прямую:

$$p = p_0 + \frac{v_0 - v}{v_0^2} D^2,$$

которая проходит через начальную точку (p_0, v_0) , причем квадрат скорости D определяется тангенсом угла наклона этой прямой к оси абсцисс. Прямая эта известна под названием прямой Михельсона. Уравнение Гюгонио принимает следующий вид:

$$E_H(p_H, v_H) - E_0(p_0, v_0) = \frac{1}{2}(p_H + p_0)(v_0 - v_H) + Q,$$

где E_H – удельная внутренняя энергия продуктов за зоной химической реакции, E_0 – удельная внутренняя энергия исходного вещества, Q – удельная теплота взрывчатого превращения, под которой понимается тепловой эффект химической реакции Q_{pv} при постоянных давлении ($p = p_0$) и объеме ($v = v_0$).

Данная величина, в общем случае, зависит от p_0 и v_0 . Она может быть постоянной и равной калориметрической теплоте взрыва Q_v только в том случае, если исходная среда и ее продукты реакции являются идеальными газами, причем с одинаковыми средними молекулярными весами и теплоемкостями (или постоянным $k = c_p/c_v$).

Вместо Q_{pv} в термохимии обычно используется Q_{pT} или Q_{vT} , но в теории детонации фундаментальное значение имеет именно Q_{pv} .

Первое слагаемое правой части уравнения Гюгонио представляет изменение внутренней энергии вследствие сжатия вещества ударной волной; второе слагаемое – избыток энергии за счет теплоты реакции. Кривая Гюгонио для детонационной волны представлена на рис. 5.16. Она построена для конечных продуктов реакции, обладающих повышенным содержанием энергии, и поэтому должна лежать соответственно выше, чем кривая Гюгонио для ударной волны (AB на рис. 5.14), производящей сжатие исходного взрывчатого вещества.

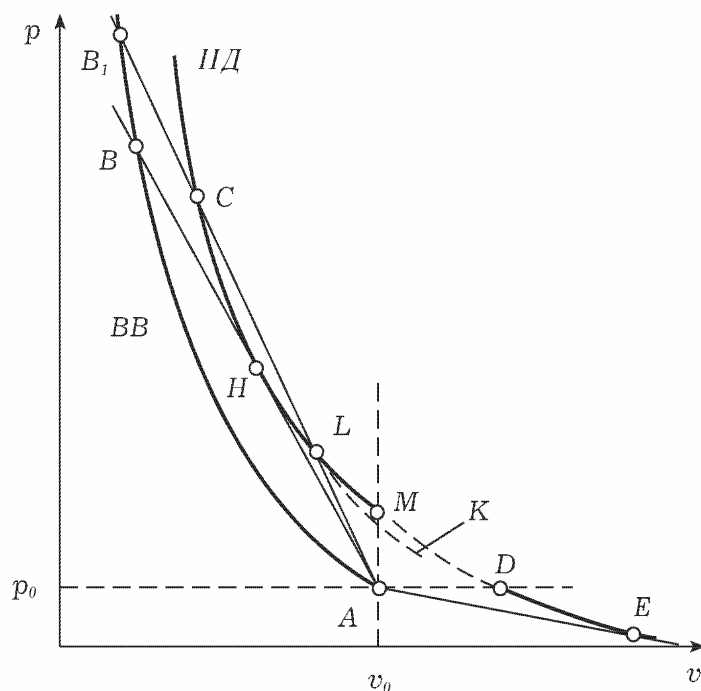


Рис. 5.16. Диаграмма процессов детонации и горения

Для процессов детонации (см. рис. 5.16) реальное значение имеет лишь ветвь СН на кривой Гюгонио для ПД ($D > 0$ и $u > 0$). Ветвь DE, где $D > 0$ и $u < 0$, соответствует процессам горения, характерным свойством которых является то, что продукты горения движутся в сторону, противоположную направлению распространения фронта пламени.

Участок MD не отвечает никакому реальному стационарному процессу, так как здесь $(p_H - p_0) > 0$ и $(v_0 - v_H) < 0$, т. е. D и u имеют мнимые значения. Проведем из точки A (p_0, v_0) прямую AC под некоторым углом α . Она пересечет кривую Гюгонио (для продуктов детонации) в двух точках. Но при этом из условия $D = v_0 \sqrt{\tan \alpha}$ вытекает, что одна и та же скорость детонации может быть реализована при двух различных состояниях разложившегося вещества во фронте волны, что с физической точки зрения является абсурдным.

Чепмен и Жуге обосновали положение, что процессу детонации отвечает лишь одно единственное состояние продуктов взрыва, характеризуемое точкой Н, в которой прямая Михельсона касается адиабаты Гюгонио для ПД (продукты детонации). Очевидно, что в этой точке $\operatorname{tg} \alpha$, а, следовательно, и скорость детонации, достигает своего минимального значения.

Эта минимальная стационарная скорость называется **нормальной скоростью детонации**.

Точка Н (см. рис. 5.16) одновременно является точкой касания адиабаты Гюгонио МНС с обычной адиабатой Пуассона НК, которая представляет собой линию постоянной энтропии ($dS = 0$). Таким образом, прямая АВ является общей касательной для обеих адиабат, т. е.

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{D^2}{v_0^2} = \frac{p_H - p_0}{v_0 - v_H} = \left(-\frac{dp}{dv} \right)_S = \frac{c_H^2}{v_H^2},$$

или

$$v_H^2 \frac{p_H - p_0}{v_0 - v_H} = v_H^2 \left(-\frac{dp}{dv} \right)_S = c_H^2.$$

Основные соотношения во фронте детонационной волны определяются на основе законов сохранения массы, импульса, энергии и условий устойчивой детонации.

Для всех точек на кривой Гюгонио, лежащих по обе стороны от точки Н, $dS > 0$, так как $\operatorname{tg} \alpha > 0$, а стоящий перед ним множитель всегда положителен. Это означает, что при всех состояниях продуктов реакции, отличающихся от точки Н, энтропия во фронте детонационной волны возрастает.

5.8. Вычисление параметров детонационных волн в газовых и конденсированных системах

Во фронте детонационной волны, при выделении тепла, происходит расширение продуктов реакции, вследствие чего давление непосредственно позади зоны превращения почти в два раза меньше, чем в исходном веществе при сжатии его ударной волной:

$$\text{для ударной волны } p_B - p_1 = \frac{2}{k+1} \rho_0 D^2 \left(1 - \frac{c_0^2}{D^2} \right);$$

$$\text{для детонационной волны } p_H - p_0 = \frac{\rho_0 D^2}{k+1} \left(1 - \frac{c_0^2}{D^2} \right).$$

$$\text{Следовательно, } \frac{(p_B - p_1)}{(p_H - p_0)} = 2 \text{ или } p_B = 2p_H.$$

Под термином «конденсированные ВВ» понимаются жидкие и твердые взрывчатые вещества. В конденсированных ВВ в единице объема сконцентрировано до 10 кДж/см^3 химической энергии, в то время как во взрывчатом газе при нормальной плотности эта величина имеет порядок 10^{-3} кДж/см^3 . Начальная плотность конденсированных ВВ может быть равна $\rho_0 \approx 2,0 \text{ г/см}^3$, а при детонации плотность ПД $\rho_H \approx 2,7 \text{ г/см}^3$, давление в детонационной волне $p_H \approx 4,0 \cdot 10^5 \text{ атм}$ (или $\approx 40 \text{ ГПа}$) и температура $T_H \approx 4000 \text{ К}$.

Весь процесс химического превращения в конденсированных ВВ длится очень малые промежутки времени ($\sim 10^{-7} \text{ с}$), что затрудняет экспериментальное изучение этого процесса, который значительно сложнее, чем во взрывчатом газе. В отличие от газа, молекулы конденсированных ВВ находятся в тесном контакте между собой, что может существенно влиять на механизм химической реакции.

Основные положения гидродинамической теории детонации, полученные для газовых взрывчатых систем, остаются в силе и для конденсированных ВВ.

Так же, как и в случае детонации газов, фронт детонационной волны представляет собой ударную волну, в которой ВВ сжимается по своей ударной адиабате как инертное вещество. Тепло химической реакции, выделяющееся за фронтом ударной волны, восполняет необратимые потери энергии, имеющие место при ударном сжатии ВВ, благодаря чему параметры ударной волны остаются постоянными.

Для приближенного определения параметров детонационной волны могут быть использованы формулы:

$$p_H = \frac{\rho_0 D^2}{k+1}, u_H = \frac{D}{k+1}, \rho_H = \rho_0 \frac{k+1}{k}.$$

Простейшие формулы для определения в детонационной волне давления p_H , массовой скорости u_H и плотности ρ_H , если известны начальная плотность ρ_0 и скорость детонации D :

$$p_H = \frac{1}{4} \rho_0 D^2, u_H = \frac{1}{4} D, \rho_H = \frac{1}{4} \rho_0.$$

Экспресс-методы расчета параметров детонации. Экспресс-методы удобны для инженерных оценок, достаточно точны, но ограничены по числу оцениваемых параметров и имеют зачастую весьма узкую область применения по элементному химическому составу, кислородному балансу и начальной плотности ВВ.

Существенно более широкими возможностями прогнозирования и одновременно высокой точностью расчета всего комплекса детонационных и энергетических характеристик ВВ, включая состав ПД и их свойства, обладают современные компьютерные программы, разработанные на основе численных методов равновесной химической термодинамики.

Получены следующие (применимые как для мощных бризантных, так и для промышленных ВВ) зависимости для расчета D и p_H

$$D = 2,641 + 3,231 \cdot 10^{-3} \sqrt{\omega}, \text{ км/с};$$

$$p_H = 1,596 + 9,378 \cdot 10^{-6} \cdot \omega, \text{ км/с};$$

$$\omega = \rho_0^2 Q_{\text{взр}} V^0,$$

где V^0 – удельный объем газообразных ПВ, вычисляемый как $V^0 = 22,47V$.

6. ДЕЙСТВИЕ ВЗРЫВА

Различают две формы работы взрыва: фугасного (общего) действия и бризантного действия.

К фугасному действию взрывов относятся:

а) разрушения, вызываемые ударными волнами и движением среды на некотором расстоянии от очага взрыва, в том числе и разрушения, вызываемые сейсмическими колебаниями;

б) выброс грунта при взрывании на выброс;

в) разрушение, рыхление, дробление значительных объемов грунта при взрывах заряда в грунте;

г) образование полости при взрыве в пластичном грунте и т. д.

На формы работы фугасного действия тратится основная часть энергии взрыва, способной обратиться в работу. Величина работы и объем, охваченный разрушениями, определяются полным количеством выделившейся энергии $E = c \cdot \varepsilon$, где c – вес заряда и ε – удельная энергия ВВ (количество энергии, выделяемой на единицу веса).

Бризантное действие взрыва заключается в интенсивном дроблении и деформации тел, непосредственно примыкающих к заряду, продуктами детонации высокого давления. Интенсивность дробления и деформации определяется в основном концентрацией энергии – энергией единицы объема в фронте детонационной волны, которая связана с величиной давления детонации. Как концентрация энергии, так и давление детонации пропорциональны величине $\rho_0 \cdot D^2$, где ρ – плотность ВВ и D – скорость детонации. Приблизительно можно считать, что давление детонации $P_{\text{дет}} \approx 1/4 \rho_0 \cdot D^2$, что для мощных ВВ большой плотности дает значение $3,5 \cdot 10^5$ атм.

6.1. Основные факторы разрушающего действия УВ и элементы закона подобия при взрыве

Для оценки разрушающего действия взрыва (особенно в случае форм работы общего действия) пользуются законом **подобия при взрыве**, позволяющим переходить от взрывов одного масштаба к взрывам другого масштаба и дающим широкие возможности моделирования явлений взрыва.

Закон подобия позволяет оценивать и сравнивать величины избыточных давлений и импульсов ударных волн, вызванных взрывами зарядов различного веса и даже совершенно различной природы.

Закон подобия устанавливает также связь разрушающего действия взрыва с величиной выделившейся энергии E (пропорциональной весу заряда c) и расстоянием R до очага взрыва.

Наиболее просто формулируются условия подобия в том случае, когда разрушения определяются величиной избыточного давления ΔP (на некотором расстоянии от заряда) или скоростью движения среды ω .

Согласно закону подобия, ΔP и ω являются однозначной функцией величины R – приведенного расстояния:

$$\bar{R} = \frac{R}{\sqrt[3]{c}},$$

где R – расстояние, м; c – вес заряда, кг.

Вместо веса заряда легко ввести энергию. Для этого принято в качестве c подставлять величину тротилового эквивалента $c_{\text{ЭКВ}}$, т. е. такой вес заряда тротила, энергия которого равна энергии данного взрыва.

Приближенно:

$$c_{\text{ЭКВ}} = c \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{\text{ТНТ}}},$$

где ε и $\varepsilon_{\text{ТНТ}}$ – удельная теплота взрыва данного ВВ и тротила. Обычно принимается $\varepsilon_{\text{ТНТ}} = 1000$ кал/г (для тротила большой плотности).

Используя тротиловый эквивалент, по существу вводят своеобразную единицу энергии:

$$1 \text{ кг ТНТ} \rightarrow 10^3 \text{ ккал}; 1 \text{ т ТНТ} \rightarrow 10^6 \text{ ккал}; 1 \text{ кт ТНТ} \rightarrow 10^9 \text{ ккал}.$$

Определив опытным путем значение $\bar{R}$, на котором возникают разрушения данного вида и интенсивности, можно оценить абсолютное расстояние для заряда с заданным тротиловым эквивалентом $c_{\text{ЭКВ}}$ (при условии, что разрушение определяется значением ΔP и ω , на котором возникают определенные разрушения).

Величина давления ударной волны в функции приведенного расстояния (от $\bar{R} = 1$ до $\bar{R} = 20 \dots 50$) может быть оценена по формуле Садовского, согласно которой избыточное давление ΔP ударной волны, распространяющейся в свободном воздухе, равно:

$$\Delta P = \frac{0,84}{\bar{R}} + \frac{2,7}{\bar{R}^2} + \frac{7,0}{\bar{R}^3}.$$

При весьма крупных, мощных взрывах ударная волна с ΔP порядка 0,2...0,3 атм. вызовет значительные разрушения большинства городских построек; ударная волна с ΔP порядка 1 атм. вызывает полное разрушение всех зданий, кроме специальных железобетонных сейсмостойких конструкций. Ориентировочно этот же порядок давления (1...2 атм.) вызывает смертельные поражения живых организмов (атм. – везде избыточная). 1 атм. соответствует нагрузке 10 т/м². При отражении ударной волны, взаимодействии ее с преградами, препятствиями или другой УВ величина ΔP может существенно увеличиться. Если для сверхмощных взрывов величина безопасного расстояния оценивается по формуле $R = \bar{R} \cdot \sqrt[3]{c}$, то для

взрывов средней мощности (отдельные заряды ВВ, склады средней и малой величины) безопасное расстояние принято рассчитывать по формуле

$$R = k \cdot \sqrt{c}.$$

В зависимости от условий расположения заряда принимается: $k = 1,0 \dots 2,0$ для разрушения малостойких каменных и деревянных зданий; $k = 2,0 \dots 4,0$ – для разрушения внутренних перегородок, рам, дверей, сараев и пр.; $k = 4,0 \dots 8,0$ – для частичного повреждения рам, дверей, перегородок и пр. Расстояние R до населенного пункта должно быть больше $10\sqrt{c}$.

6.2. Действие взрыва на здания, сооружения и оборудование.

Виды разрушения

При взрыве действует весьма мощная, кратковременная и переменная нагрузка. Наибольшим разрушениям этими факторами подвергаются здания и сооружения больших размеров с мягкими несущими конструкциями, значительно возвышающимися над поверхностью земли, а также немассивные бескаркасные сооружения с несущими стенами из кирпича и бетона. Подземные же и заглубленные в грунт сооружения обладают значительной сопротивляемостью разрушению. Из перечисленных параметров УВ решающим (характеризующим разрушение) являются избыточное давление ΔP , как это было уже указано выше. При разрушении высокого сооружения с малой площадью (мосты, трубы) определяющим является скоростной напор $\Delta P_{ск}$.

Разрушения подразделяются на полные, сильные, средние и слабые.

Полные разрушения. В зданиях и сооружениях обрушены все перекрытия и разрушены все несущие конструкции. Восстановление невозможно. Оборудование, средства механизации и другая техника восстановлению не подлежит. В коммуникационно-энергетических сетях (КЭС) имеются значительные разрывы кабелей, разрушение участков трубопроводов, опор, воздушных линий электропередач (ЛЭП).

Сильные разрушения. В зданиях и сооружениях значительные деформации несущих конструкций, разрушена большая часть перекрытий и стен. Восстановление возможно, но нецелесообразно, так как практически сводится к новому строительству с использованием только сохранившихся конструкций (фундамент и подвалы). Оборудование и механизмы большей частью разрушены и значительно деформированы. Отдельные детали могут быть использованы в качестве запасных частей. В КЭС разрывы и деформации отдельных участков подземных сетей, ЛЭП, разрывы технологических трубопроводов.

Средние разрушения. В зданиях и сооружениях разрушены не несущие и второстепенные конструкции (легкие стены, перегородки, окна, двери).

Возможны трещины в наружных стенах и вывалы в отдельных местах. Перекрытия и подвалы не разрушены. Часть помещений пригодна к эксплуатации, для восстановления требуется капитальный ремонт. В КЭС разрушения и деформации, которые можно устранить капитальным ремонтом.

Слабые разрушения. В зданиях и сооружениях разрушена часть перегородок, дверных и оконных проемов. Оборудование имеет незначительные деформации. В КЭС незначительные деформации и поломки конструктивных элементов. Для восстановления элементов зданий и сооружений, оборудования, элементов КЭС требуется текущий ремонт.

6.3. Зоны действия взрыва

Различают следующие зоны действия взрыва (рис. 6.1).

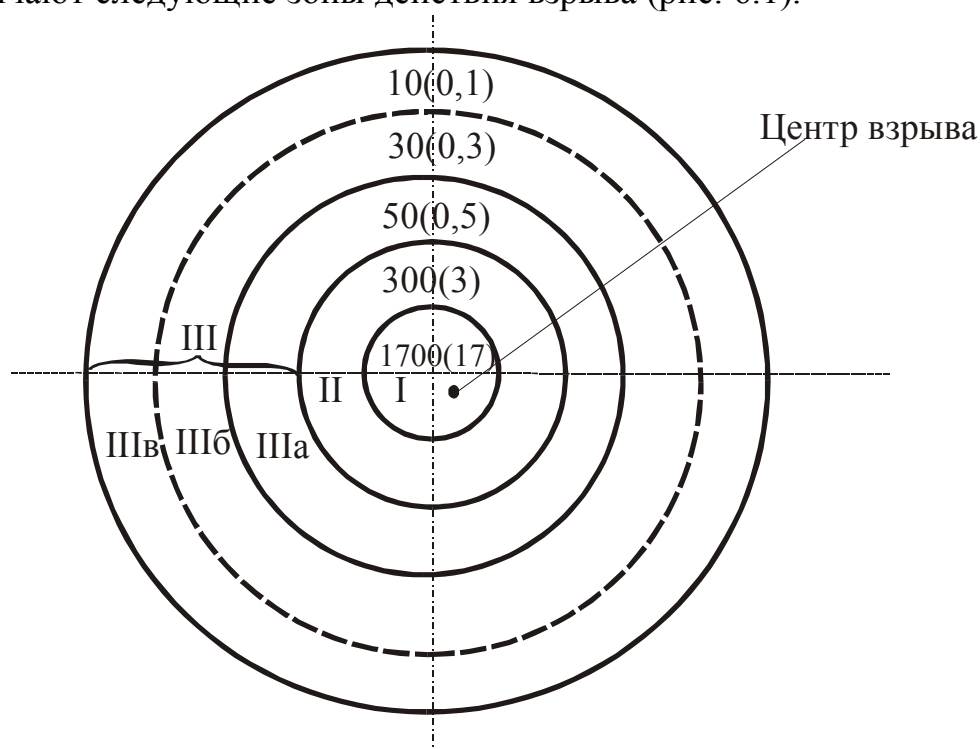


Рис. 6.1. Зоны действия взрыва: I – детонационная волна (продукты взрыва) – полное разрушение; II – фугасного действия – полное разрушение; III – ударной волны: IIIa – зона сильных разрушений; IIIб – зона средних разрушений; IIIв – зона слабых разрушений

6.4. Действие взрыва на организм человека

Продукты взрыва и ударная волна способны наносить человеку различные травмы, в том числе смертельные.

В указанных зонах (см. рис. 6.1) – зоне полного разрушения (I, II) наблюдается полное поражение людей, связанное с разрывами тела на части, обугливание его и т. д.

В зоне III – зонах ударной волны поражение людей вызывается как непосредственным, так и косвенным воздействием УВ.

При непосредственном воздействии ударной волны основной причиной травм у людей является мгновенное повышение давления, что воспринимается человеком как резкий удар, при этом возможны различные травмы (табл. 6.1).

Таблица 6.1

Характеристика поражения человека действием ВУВ

Вид поражения	Характеристика поражения	Избыточное давление, ΔP , кПа (кг/см ²)
1. Легкие	Мягкая контузия, временная потеря слуха, ушибы и вывихи конечностей	20...40 (0,2...0,4)
2. Средние	Травмы мозга с потерей сознания, повреждение органов слуха, кровотечение из носа и ушей, сильные переломы и вывихи конечностей	40...60 (0,4...0,6)
3. Тяжелые	Сильная контузия всего организма, повреждение внутренних органов и мозга, тяжелые переломы конечностей, возможны смертельные случаи	600...1000 (0,6...1,0)
4. Крайне тяжелые	Получение травмы очень часто приводит к смертельному исходу	> 100 (>1,0)

Кроме этого, движущиеся за фронтом слои сжатого воздуха (скоростной напор) могут оказать метательное действие. Метательное действие скоростного напора воздуха граничит в зоне с избыточным давлением больше 50 кПа.

Характер и тяжесть поражения людей зависит от величины параметров УВ, положения человека в момент взрыва и степени его защищенности. При прочих равных условиях наиболее тяжелые поражения получают люди, находящиеся в момент прихода УВ вне укрытия в положении стоя. В этом случае площадь воздействия на человека скоростного напора воздуха будет примерно в 6 раз больше, чем в положении лежа.

Поражающие действия УВ подразделяются на легкие, средние, тяжелые и крайне тяжелые.

Поражение людей, находящихся в момент взрыва в зданиях и сооружениях, зависит от степени их разрушения. Так, например, при сплошных разрушениях следует ожидать полной гибели людей. А при сильных и средних разрушениях примерно погибает половина людей, а остальные получают травмы различной степени тяжести. Косвенное воздействие УВ – поражение людей летящими осколками зданий и сооружений.

Световое и тепловое излучение. Поражающее действие теплового излучения является наиболее частым спутником случайных взрывов. Взрывы ракетных топлив (включая твердые и жидкие топлива), взрывы химических продуктов, разрыв сосудов с последующим взрывом облака паров в ограниченном или открытом объеме, горение жидкостей в открытых резервуарах, детонация бризантных ВВ и ядерные взрывы – все эти явления могут привести к образованию огненных шаров.

При ядерных взрывах действие теплового излучения может вызвать особенно тяжелые последствия, составляя значительную часть поражающего эффекта при использовании ядерного оружия.

Световое излучение ядерного взрыва при непосредственном воздействии вызывает ожоги открытых участков тела, временное ослепление или ожоги сетчатки глаз. Возможны вторичные ожоги, возникающие от пламени горящих зданий, сооружений, растительности, воспламенившейся или тлеющей одежды.

Независимо от причин возникновения, ожоги разделяют по тяжести поражения организма.

Ожоги первой степени выражаются в болезненности, покраснении и припухлости кожи. Они не представляют серьезной опасности и быстро вылечиваются без каких-либо последствий. При *ожогах второй степени* образуются пузыри, заполненные прозрачной белковой жидкостью; при поражении значительных участков кожи человек может потерять на некоторое время трудоспособность и нуждается в специальном лечении. Пострадавшие с ожогами первой и второй степеней, достигающими даже 50–60% поверхности кожи, обычно выздоравливают. *Ожоги третьей степени* характеризуются омертвлением кожи с частичным поражением росткового слоя. *Ожоги четвертой степени:* омертвление кожи и более глубоких слоев тканей (подкожной клетчатки, мышц, сухожилий костей). Поражение ожогами третьей и четвертой степени значительной части кожного покрова может привести к смертельному исходу.

Степень ожогов световым излучением закрытых участков кожи зависит от характера одежды, ее цвета, плотности и толщины. Люди, одетые в свободную одежду светлых тонов, одежду из шерстяных тканей, обычно меньше поражены световым излучением, чем люди, одетые в плотно прилегающую одежду темного цвета или прозрачную, особенно одежду из синтетических материалов.

Большую опасность для людей и сельскохозяйственных животных представляют пожары, возникающие на объектах народного хозяйства в результате воздействия светового излучения и ударной волны. По данным иностранной печати, в городах Хиросима и Нагасаки примерно 50% всех смертельных случаев было вызвано ожогами; из них 20–30% – непосредственно световым излучением и 70–80% – ожогами от пожаров.

Поражение глаз человека может быть в виде временного ослепления – под влиянием яркой световой вспышки. В солнечный день ослепление длится 2–5 мин, а ночью, когда зрачок сильно расширен и через него проходит больше света, – до 30 мин и более. Более тяжелое (необратимое) поражение – ожог глазного дна – возникает в том случае, когда человек или животное фиксирует свой взгляд на вспышке взрыва. Такие необратимые поражения возникают в результате концентрированного (фокусируемого хрусталиком глаза) на сетчатку глаза прямо падающего потока световой энергии в количестве, достаточном для ожога тканей. Концентрация энергии, достаточной для ожога сетчатой оболочки, может произойти и на таких расстояниях от места взрыва, на которых интенсивность светового излучения мала и не вызывает ожогов кожи.

Любая непрозрачная преграда, любой объект, создающий тень, могут служить защитой от него. Используя для укрытия ямы, канавы, бугры, насыпи, простенки между окнами, различные виды техники, кроны деревьев и т. п., можно значительно ослабить или вовсе избежать ожогов от светового излучения. Полную защиту обеспечивают убежища и противорадиационные укрытия.

6.5. Кумулятивный эффект и его использование

Понятие кумуляции. Кумулятивные заряды. Термин «кумуляция» происходит от латинского *sumulato* – «скопление» или *sumulo* – «накапливаю» и дословно означает увеличение или усиление какого-либо эффекта за счет сложения или накопления нескольких однородных с ним эффектов.

Эффект концентрации энергии в определенном направлении или в определенном месте и является **кумуляцией**. Если при обычном взрыве энергия «разбрасывается» во все стороны, то при кумулятивном она «собирается» в некотором направлении.

Кумулятивный эффект есть существенное повышение местного действия взрыва в одном направлении. Этот эффект получается при использовании зарядов, имеющих на одном из концов полость – кумулятивную выемку. Если такой заряд инициировать с противоположного конца, то эффект действия в направлении оси выемки оказывается значительно большим, чем при действии обычных зарядов. Если же к тому же поверхность кумулятивной выемки покрыть сравнительно тонкой металлической облицовкой, то пробивное действие такого заряда во много раз увеличится.

Сравнительный эффект действия обычных и кумулятивных зарядов (КЗ) проиллюстрирован на рис. 6.2. При детонации заряда взрывчатого вещества (ВВ) без кумулятивной выемки наблюдается неглубокая вмятина в материале преграды (а), при незначительном удалении заряда от преграды эффект воздействия на преграду резко снижается (б). Наличие кумулятивной выемки в заряде приводит к концентрации плотности энергии, что

проявляется в увеличении глубины вмятины в материале преграды (в). С удалением рассматриваемого КЗ от преграды эффект взрывного воздействия также резко снижается (г). Применение металлической облицовки в КЗ приводит к резкому увеличению пробивного действия, при этом глубина проникания кумулятивной струи (КС) существенно зависит и от расстояния КЗ от преграды (д, е).

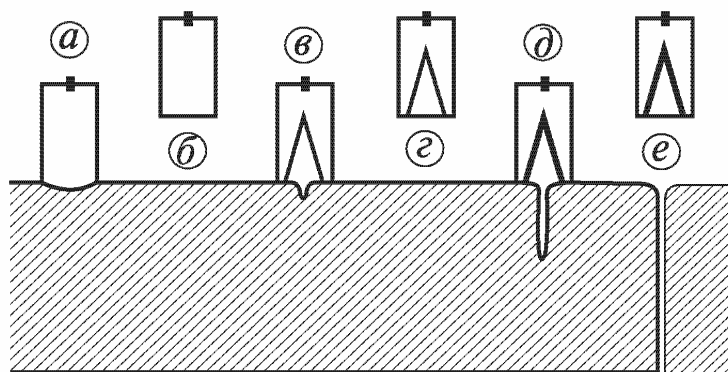


Рис. 6.2. Результаты взрывного воздействия обычных и КЗ на преграду из мягкой стали

Различия в степени воздействия КЗ без облицовки кумулятивной выемки и с металлической облицовкой связаны с физическими особенностями реализуемых режимов пространственной концентрации плотности энергии. В первом случае эффект кумуляции проявляется в формировании газокумулятивной струи, представляющей собой высокоскоростной направленный поток продуктов взрыва (ПВ) повышенной плотности энергии (скорость такой струи может превышать даже вторую космическую скорость – 11,2 км/с). Однако такая газокумулятивная струя имеет относительно низкую эффективность действия по преграде, особенно на некотором удалении от нее, что обусловлено быстрым расширением газообразных ПВ вследствие неравномерного распределения по длине струи и наличия поперечных пульсаций в струе. Это приводит к радиальному рассеиванию и быстрому снижению плотности продуктов взрыва.

В присутствии металлической облицовки на поверхности выемки наблюдается очень резкое усиление кумулятивного эффекта. В данном случае сохраняются те физические особенности, которые характерны для взрыва КЗ без облицовки выемки. Однако картина рассматриваемого явления при этом существенно меняется. В результате экспериментальных и теоретических исследований было установлено, что усиление кумулятивного эффекта при наличии облицовки связано с весьма сильным и своеобразным перераспределением энергии между ПВ и материалом металлической облицовки, а также переходом части металла в кумулятивную струю.

Основная часть энергии активной части КЗ «перекачивается» в металл облицовки так, что оказывается сконцентрированной в его тонком слое, который собственно и образует кумулятивную струю. Максимальное отношение диаметра выемки к диаметру струи для заряда без облицовки равно 4–5. Для заряда с металлической облицовкой выемки это отношение значительно больше, так как диаметр КС значительно меньше, чем для зарядов без облицовки.

Структурная характеристика КЗ обусловлена особенностями их конструктивного оформления и функциональным назначением. Различают сосредоточенные (осесимметричные) и удлиненные (плоские) кумулятивные заряды (рис. 6.3).

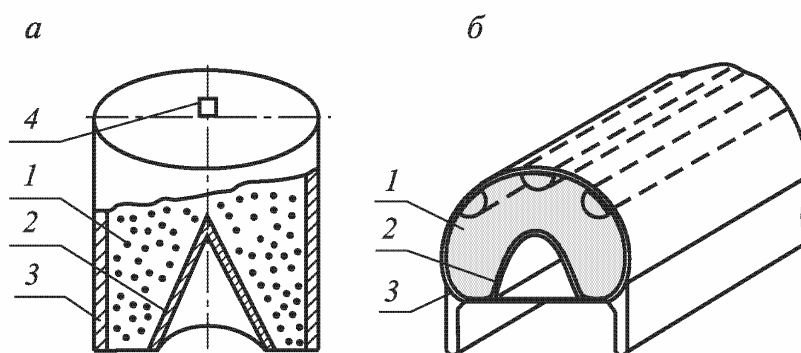


Рис. 6.3. Кумулятивные заряды:
а – сосредоточенный, б – удлиненный

Представленные схемы КЗ включают следующие структурные элементы: 1 – заряд ВВ с кумулятивной выемкой, 2 – облицовка кумулятивной выемки, 3 – корпус КЗ, 4 – средство инициирования.

Наибольшее значение для практики имеет направленная осевая кумуляция. Этот вид кумуляции может быть реализован при подрыве осесимметричных зарядов (см. рис. 6.3, а), имеющих выемку той или иной формы (конус, полусфера, парабола, гипербола и т. п.). Такие КЗ способны пробивать насквозь стальные преграды.

Удлиненные КЗ с плоской симметрией (см. рис. 6.3, б) имеют кумулятивную выемку, поперечное сечение которой может иметь форму угла (клиновидные облицовки), параболы, полуокружности (полуцилиндрические облицовки) и т. п. При взрыве они формируют пелену или кумулятивный «нож», который и разрезает преграду. Основными элементами удлиненного КЗ являются корпус 3, заряд взрывчатого вещества 1 и металлическая облицовка 2 кумулятивной выемки, причем последняя, как правило, формируется из заготовки совместно с корпусом.

Область использования кумулятивного эффекта определяется конструктивными особенностями и функциональным назначением кумулятивных зарядов.

Сосредоточенные осесимметричные КЗ используются в военной технике для пробития сильнозащищенных и бронированных целей; в кумулятивных перфораторах – для пробивания обсадных труб нефтяных, газовых, нагнетательных и водозаборных скважин; для образования шпуров под заряды ВВ в массивах материалов, негабаритах горных пород и металлических скрапах; для «прошивки» отверстий в плитах из различных материалов и т. п.

Удлиненные КЗ применяются для взрывной резки и разделки материалов и конструкций, разделения ступеней ракет, перерубания свай, кабелей, тросов и т. п.

В основе явления, известного как сварка взрывом, лежит частный случай плоской кумуляции, реализуемой при метании двух пластин под определенным углом друг к другу.

Краткие исторические сведения. Открытие кумулятивного эффекта связывают с разработкой взрывных петард, вошедших во всеобщее употребление в горнодобывающей промышленности во второй половине XVIII-го века. Горным инженерам уже тогда было известно, что некоторую часть энергии взрыва можно сконцентрировать, если придать заряду соответствующую форму. В 1792 г. (по другим данным – в 1799 г.) немецкий минный инженер и естествоиспытатель Франц фон Баадер (Baader) впервые сфокусировал энергию фугасного заряда, создав в нем полость. Дальнейшее развитие кумулятивный эффект получил во второй половине XIX-го века. В 1864 г. русский военный инженер М.М. Боресков выявил повышенный эффект действия у инженерных мин с кумулятивной выемкой и использовал его для разрушения твердых пород при строительстве фортификационных сооружений, а уже в 1865 г. в России, для усиления направленного действия при взрыве, был применен первый капсюль-детонатор с конической кумулятивной выемкой. Примерно в это же время подобный капсюль-детонатор был предложен известным изобретателем Альфредом Нобелем (Nobel).

Первые научные работы по исследованию кумулятивного эффекта полых необлицованных зарядов ВВ были опубликованы в Германии М. Ферстером (Foerster) в 1883 г. и Е. Нейманом (Neumaun) в 1914 г., а в Великобритании и США – К. Монро (Munroe) в 1888 г. В период с 1910 г. по 1914 г. в Великобритании и Германии были получены первые патенты на применение металлических облицовок кумулятивных выемок и использование кумулятивного эффекта в бронебойных снарядах, однако перевести работы в полностью практическое русло для военных целей не удалось до начала второй мировой войны. В России первые систематические исследования явления кумуляции были проведены в 1923–1926 гг. профессором М.Я. Сухаревским, который показал целесообразность использования КЗ в качестве эффективных подрывных средств и установил зависимость пробивного действия КЗ без облицовки от формы кумулятивной выемки и ряда других факторов.

Качественным скачком, обусловившим широкое применение кумулятивного эффекта, явилось использование металлической облицовки кумулятивной выемки. При взрыве заряда с кумулятивной выемкой без облицовки образуется газовая струя, а с металлической облицовкой – металлическая кумулятивная струя. Хотя скорость у газовой струи выше, чем у металлической, но, вследствие большого диаметра и малой плотности, ее воздействие на преграды во много раз слабее.

Облицовку обычно делали из меди, цинка, алюминия, железа или стали. Кумулятивный эффект увеличивался при установке облицованного КЗ на определенном расстоянии от преграды.

Результаты экспериментальных и теоретических исследований явления кумуляции позволили к началу второй мировой войны создать первые образцы боевой техники. В 1939–1943 гг. в Германии были разработаны 75-мм бронебойные кумулятивные снаряды, 30-мм и 40-мм кумулятивные гранаты, а в России – 76-мм и 122-мм бронебойные кумулятивные снаряды, тяжелая ручная кумулятивная противотанковая граната РПГ-6. В первой открытой публикации по основам теории действия КЗ с металлической облицовкой выемки приведена схема головной части американского снаряда «базука» и описан принцип его действия.

На рис. 6.4 показано поперечное сечение головной части ракеты «базука». Когда баллистический колпачок 1 встречается поверхность поражаемой преграды, удар вызывает инерционное смещение ударника во взрывателе 3 и происходит детонация заряда 2. Взрыв сминает стальной конус облицовки 4, образуется струя высокой скорости и плотности, которая пробивает преграду и может поразить различные объекты и агрегаты, находящиеся за ней. Указанные разработки надолго определили основное направление практического использования кумулятивного эффекта – в военных целях.

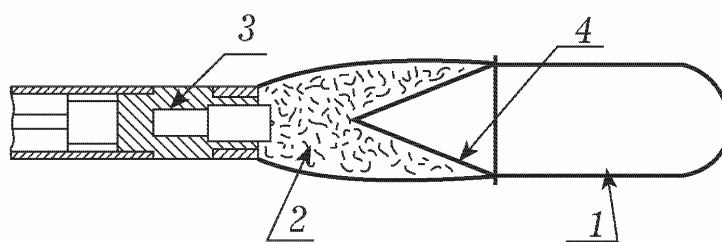


Рис. 6.4. Схема головной части американской ракеты «базука»

Параллельно с практической реализацией кумулятивного эффекта, примерно с 1941 по 1949 гг., была создана теория этого явления, которая в дальнейшем получила исключительное развитие во всех странах. В России над этой проблемой работали Лаврентьев, Покровский, Баум, Станюкович и др. В настоящее время крупные исследования в области кумуляции проводятся в США, Германии, Великобритании, Франции и России.

Механизм формирования кумулятивной струи. Совместные теоретические и экспериментальные методы исследований позволяют получить представление о процессе образования кумулятивной струи. Всесторонними экспериментальными исследованиями, применяя методы мгновенной рентгенографии, искровой фотографии и т. п., удалось установить природу КС и механизм ее формирования. Особенно плодотворным при исследовании явления кумуляции в присутствии металлической облицовки оказался метод мгновенной рентгенографии.

Наиболее подробно процесс изучен на осесимметричных зарядах с конической и полусферической облицовками выемок. В итоге этих исследований было установлено, что металлическая облицовка под воздействием ПВ обжимается, в результате чего ее элементы последовательно захлопываются с образованием тонкой металлической струи, обладающей большой скоростью.

Общая картина процесса деформирования металлической облицовки и образования КС показана на двух сериях рентгеновских снимков для конической (а) и полусферической (б) форм облицовок (рис. 6.5). Они фиксируют начальный момент процесса обжатия облицовки и движения струи во времени. При этом давление продуктов детонации на облицовку имеет порядок 20–60 ГПа, в зависимости от материала облицовки, угла подхода фронта детонационной волны (ДВ) к поверхности облицовки и характеристик ВВ, а скорость метаемой тонкой металлической облицовки имеет порядок 1–3 км/с. В результате столь сильного и быстрого обжатия облицовки, при последовательном деформировании и захлопывании отдельных ее элементов, образуется компактная монолитная масса – пест и формируется тонкая металлическая струя, скорость которой может в несколько раз превышать скорость обжатия металлической облицовки. Образованию остающегося песта можно в значительной мере воспрепятствовать, формируя слой облицовки, образующий пест, из материала, который под воздействием ПВ может сгорать или испаряться (специальные биметаллические облицовки).

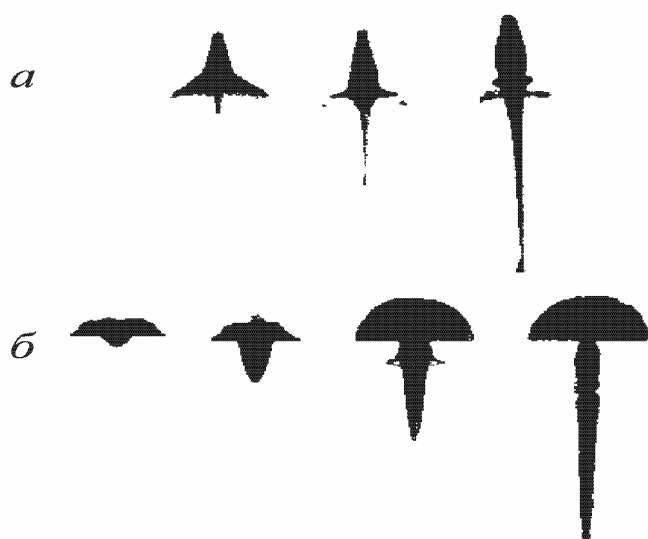


Рис. 6.5. Рентгенограммы начальной стадии формирования КС зарядами с конической (а) и полусферической (б) облицовками

Картина формирования КС при обжати металлической конической облицовки осесимметричного КЗ схематично показана на рис. 6.6. Фронт ДВ 2 в заряде ВВ 3 начинает распространяться от детонатора 1 со скоростью детонации D . Образующиеся продукты детонации (ПД) взаимодействуют с облицовкой 4 кумулятивной выемки. При последовательном схлопывании облицовки образуется пест 5 и кумулятивная струя 6.

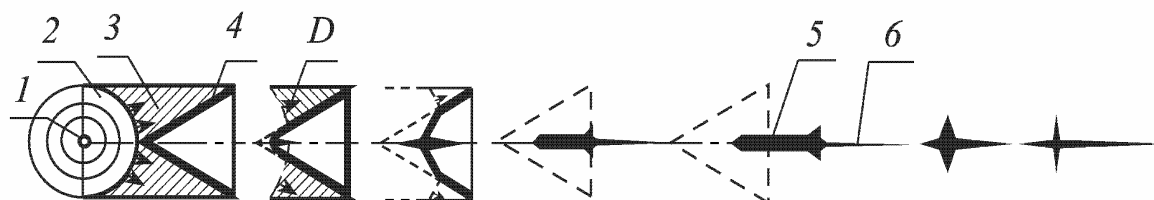


Рис. 6.6. Формирование КС при обжати металлической облицовки осесимметричного кумулятивного заряда

Результаты обработки рентгенограмм показывают, что, в случае использования конических медных облицовок, в струю переходит в среднем 10–20 % массы облицовки, скорость головных участков струи составляет 9–10 км/с, а хвостовых 2–2,5 км/с. Скорость струи от полусферической облицовки приблизительно в два раза меньше, но масса ее в три-четыре раза больше, так что общая энергия струи от полусферической облицовки сравнима с энергией струи от конуса такой же массы.

При обжати облицовки толщина ее увеличивается, а энергия концентрируется преимущественно в ее внутреннем слое. Механизм образования КС связан с течением материала внутренних слоев облицовки, что является следствием высокоскоростного соударения ее элементов в момент захлопывания, при этом струя как бы «выжимается» из металлической облицовки в процессе осевого схлопывания ее внутренних слоев.

Условия формирования КС определяются микроструктурой металла облицовки и способностью его структурных составляющих к пластической деформации.

Однако пластичность металла в условиях обжати под действием взрыва не определяется однозначно его стандартными характеристиками. Отмечена зависимость между способностью металла к быстрому обжатию и типом кристаллической решетки. Тяжелые пластичные металлы, в частности гранецентрированные металлы с кубической решеткой группы меди, и некоторые сплавы образуют сплошные струи, плотность которых не более, чем на 10% ниже плотности материала облицовки, и которые при большом удлинении (примерно в 10 раз по сравнению с исходной длиной образующей облицовки) не разрываются и сохраняют высокую плотность. Другие металлы, такие, например, как железо и цинк, на начальных стадиях образуют сплошные струи, которые, в отличие от описанных выше, при растяжении разрываются гораздо раньше.

Хрупкие металлы, такие, в частности, как вольфрам, титан, а также металлы с высокой пористостью, получаемые спеканием, вообще не образуют сплошных струй, они формируют дискретные струи, состоящие из отдельных твердых частиц. В этом случае растяжение струи приводит не к уменьшению ее диаметра, как в сплошных струях, а к снижению средней плотности струи. Поражающая способность таких струй, по сравнению со сплошными, значительно ниже. При существенном увеличении углов схлопывания (переходе на пологие конические или полусферические облицовки), наряду с классическим режимом кумулятивного струеобразования, возможен так называемый режим «обратной кумуляции», связанный с механизмом выворачивания кумулятивной облицовки.

На рис. 6.7 схематично показаны различные режимы кумуляции, связанные с изменением угла конической облицовки и профиля полусферической облицовки.

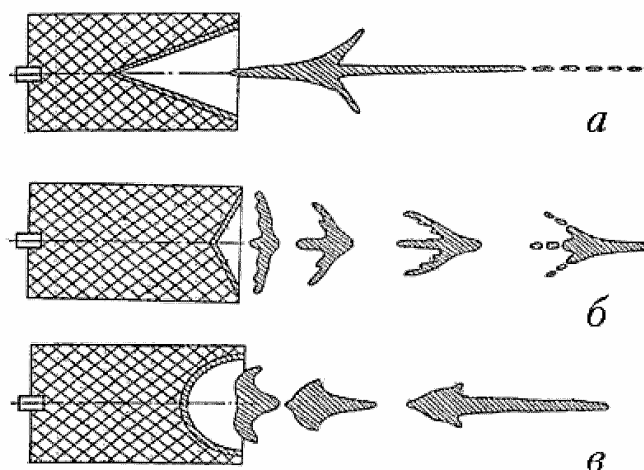


Рис. 6.7. Различные режимы кумуляции:
а – классическая кумуляция; б – «обратная»
кумуляция; в – промежуточный режим

Проникание кумулятивной струи в преграду. При взаимодействии КС с преградой, на границе между материалом струи и преграды возникает очень высокое давление, на один–два порядка превосходящее предел прочности материала преграды. В результате возникающего давления КС разворачивается и «срабатывается», ее материал растекается в направлении, обратном скорости ее движения. Материал преграды также «уходит» из зоны высокого давления, причем часть материала выносится вместе со струей к свободной поверхности, а другая часть, за счет пластического деформирования, перемещается в радиальном направлении. Таким образом, образуется кратер, диаметр которого существенно превышает диаметр кумулятивной струи.

В табл. 6.2 приведены значения относительной глубины проникания КС в преграды из разных материалов применительно к взрыву стандартного заряда.

Таблица 6.2

Зависимость относительной глубины проникания (L/L_s) КС от плотности материала преграды (ρ_T)

Материал преграды	$\rho_T \cdot 10^{-3}, \text{ кг/м}^3$	L/L_s
Мягкая сталь (эталон)	7,8	1,0
Броневая сталь средней твердости	7,8	0,8
Свинец	11,3	1,3
Бетон	2,3	3,5
Плексиглас	1,2	2,8
Полиэтилен	0,92	5,0
Парафин	0,9	7,2
Резина	1,1	6,4

В табл. 6.3 приведены данные о влиянии прочности соответствующих металлов на глубину проникания кумулятивной струи.

Таблица 6.3

Зависимость проникающего действия струи (L) от твердости преграды (H_B)

Материал преграды	H_B	$L, \text{ мм}$
Сталь	100	111
Сталь	350	80
Алюминиевый сплав	50	327
Алюминиевый сплав	200	256

В целом глубина проникания струи в преграду зависит от:

- размеров и формы КЗ;
- формы, геометрии и материала КО;
- качества, энергосодержания, плотности и скорости детонации ВВ;
- расстояния заряда от преграды;
- наличия «линзы»;

точности изготовления различных деталей КЗ и точности их сборки.

7. ОСОБЕННОСТИ ВЗРЫВА В ГРУНТЕ И ВОДЕ

7.1. Характерные особенности грунтов

Исследование взрыва в грунте осложняется тем, что структура и свойства грунтов (горных пород) меняются в широких пределах. Грунты могут быть сыпучими, пластичными, хрупкими; их удельный вес и особенно прочность существенно различаются.

Специфические трудности возникают также при экспериментальном определении параметров УВ в твердой среде. Ударные волны в грунте могут иметь несколько необычный профиль, в частности, пологий фронт. Скорости распространения в грунте могут быть меньше звуковых. Помимо продольных волн, возникающих в воздухе и в воде, в твердой среде возникают также волны поперечного сдвига, которые обычно распространяются со скоростями несколько меньшими продольных. Наконец, на поверхности раздела возникают и распространяются своеобразные поверхностные волны.

Запись $p(t)$ в грунте может быть получена с помощью пьезодатчиков или тензодатчиков, однако применять их надо с особым вниманием и осмотрительностью. Так, при введении датчиков в грунт, связанным с нарушением его сплошности, запись $p(t)$ может быть настолько искажена, что станет совершенно непохожа на ударную волну, идущую по сплошному грунту. Однако, в настоящее время существуют довольно надежные методы записи $p(t)$, особенно в сыпучих и пластичных грунтах.

7.2. Зоны действия и разрушающее действие взрыва в грунте

Результат воздействия взрыва на среду обычно принято описывать 4 зонами:

- зоной вытеснения;
- зоной разрушения (слой раздавливания);
- зоной разрывов (слой «радиальных трещин»);
- и зоной сотрясения (сейсмические возмущения).

При взрыве в сплошной пластичной среде образуется полость, объем которой зависит от веса заряда и свойств среды. Другими словами, это область, из которой продукты взрыва высокого давления полностью вытеснили грунт, образовав полость (так называемый «котел»).

Картина деформаций и разрушений, получающихся при действии взрыва на большинство горных пород (схематически) представлена на рис.7.1.

В центре очага взрыва обычно образуется полость (R_B), из которой вещество среды «выжато» высоким давлением (зона вытеснения). К полости примыкает зона раздавливания (R_P), в которой среда (грунт) полностью разрушен интенсивной волной сжатия.

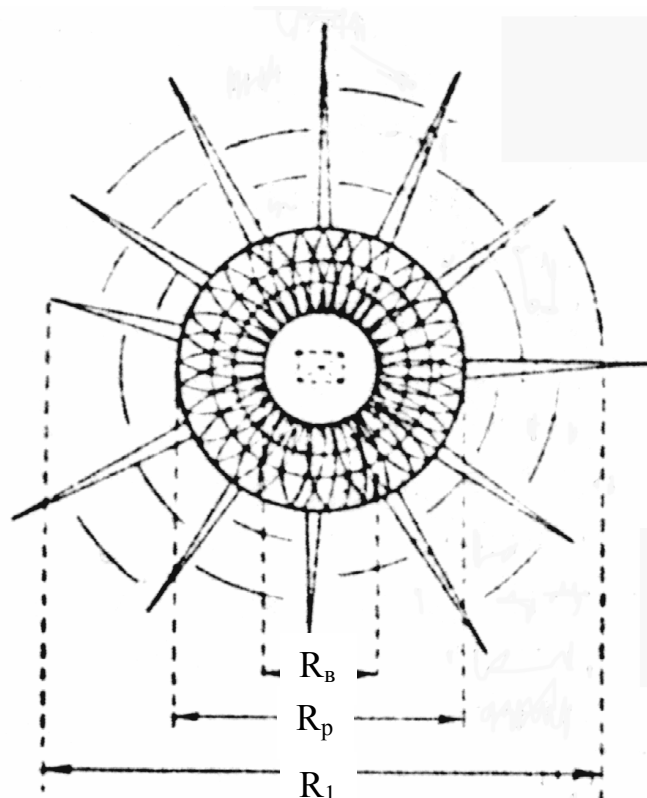


Рис. 7.1. Схема разрушающего действия взрыва в среде (расположение зон): 1 – зона вытеснения $R_{\text{в}}$; 2 – зона разрушения $R_{\text{р}}$ (грунт разрушен); 3 – зона разрывов $R_{\text{л}}$ (слой «радиальных трещин»); 4 – зона сотрясения (сейсмические возмущения)

К зоне раздавливания примыкает зона разрывов (слой «радиальных трещин» ($R_{\text{л}}$)). В этой зоне волна сжатия уже не может раздавить материал среды, но он начинает двигаться в направлении распространения волны; в среде возникают растягивающие напряжения, которые и вызывают появление радиальных трещин (известно, что горные породы значительно легче разрушаются при растяжении, чем при сжатии). Далее на значительных расстояниях от очага взрыва среда не разрушается, но в ней распространяются сейсмические возмущения (зона сотрясения) – сложные колебания, включающие продольные, поперечные, а также поверхностные волны. Эти колебания могут вызвать разрушение сооружений, находящихся в грунте, или на его поверхности.

Сейсмически безопасные расстояния могут быть оценены по формуле

$$R = k_{\text{с}} \sqrt[3]{c},$$

где $k_{\text{с}}$ – коэффициент, зависящий от свойств грунта.

Разрушение среды растягивающими усилиями может быть весьма существенно увеличено, если свободная поверхность среды расположена ближе к поверхности.

При отражении от свободной поверхности волна сжатия трансформируется в волну растяжения; если волна достаточно интенсивна, то это приводит к разрушению среды в значительном объеме, имеющем форму перевернутого конуса (рис. 7.2).

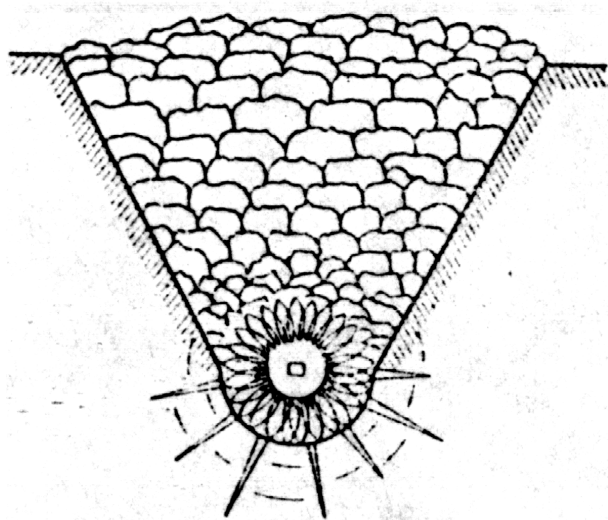


Рис. 7.2. Схема разрушающего действия взрыва вблизи от свободной поверхности

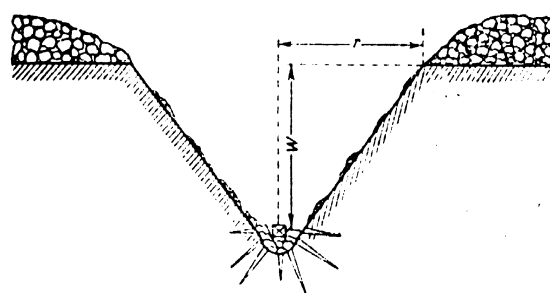


Рис. 7.3. Схема выброса при взрыве

Если расстояние от заряда до свободной поверхности W еще меньше, то большая часть разрушенной среды выбрасывается при взрыве наружу – вверх и в стороны; образуется воронка выброса (рис.7.3). Как взрывание для дробления (рыхления), так и взрывание на выброс широко используется в практике горного дела. Заряд (в кг), необходимый для выброса, обычно рассчитывают по формуле, представляющей собой частный вывод закона подобия при взрыве:

$$C = k \cdot W^3 \cdot f(n),$$

где $f(n) = 0,4 + 0,6n^3$; k – зависит от свойств среды (грунта); $f(n)$ – от вида образуемой воронки (от соотношения ее радиуса $r \cdot k \cdot W$; если $r/W = t = 1$, то $f(n) = 1$).

Значение k колеблется от 1,0 для слабых грунтов до 2,0...2,5 для самых прочных гранитов, базальтов и пр.

Заряд рыхления может быть рассчитан по формуле

$$C = 1/3 \cdot k \cdot W^3 .$$

Действие взрыва на среду может быть изменено и усилено разными способами. Если в среде заложено несколько зарядов, то, взрывая их в соответствующие моменты времени, можно управлять разрушающим действием взрыва, в частности, получать направленный выброс, при котором отброс среды происходит преимущественно в заданном направлении. Весьма сильной формой направленного взрыва является кумулятивное действие, получаемое от зарядов, снабженных специальной выемкой с тонкой металлической облицовкой. Образующаяся при взрыве кумулятивного заряда кумулятивная струя обладает сильнейшим пробивным действием.

7.3. Ударные волны в воде

В результате взрыва заряда ВВ в однородной водной среде (далеко от дна и от поверхности) в воде возникает пузырь из нагретых сжатых газов, давление которых будет значительно выше давления в окружающей среде. Расширяясь, газы образуют в воде ударную волну, также как это имеет место в воздухе. Понятно, что свойства ударных волн и их характеристики должны зависеть от свойств среды.

По мере расширения пузыря давление в нем быстро падает. В некоторый момент времени давление в газовом пузыре сравнивается с давлением в окружающей среде, но расширение на этом не заканчивается. Вода, прилегающая к газовому пузырю, имея значительную скорость, некоторое время будет двигаться по инерции, растягивая пузырь. После того, как движение воды прекратится, давление в пузыре будет меньше, чем давление в окружающей среде; газовый пузырь начнет сжиматься, опять пройдет положение равновесия и, таким образом, будет некоторое время пульсировать. Такую пульсацию можно заметить также при взрыве в воздухе, однако, в воде из-за большей плотности и больших сил инерции это явление особенно рельефно. Пульсирующий пузырь начинает двигаться вверх, как бы «всплывая» в воде.

Для воды характерно сравнительно высокое значение скорости звука $C_0 \approx 1500$ м/с. Скорость УВ в воде, уменьшаясь по мере распространения, быстро достигает значения скорости звука и волна приобретает «акустический» характер, хотя давление в ней могут быть еще значительными.

Так, если рассмотреть УВ в воде с чрезвычайно большим давлением на фронте $p_1 = 5000$ кг/см², то за фронтом такой волны будет поток воды со значительной скоростью $\omega = 250$ м/с. Волна будет распространяться со скоростью $D = 1975$ м/с, значительно превышающей скорость звука. Но если давление на фронте ударной волны в воде снизится до величины 250 кг/см², которая еще весьма значительна, то такая волна будет иметь скорость потока за фронтом всего лишь $\omega = 15$ м/с и скорость ее распространения окажется практически равной скорости звука. Вследствие того,

что УВ в воде быстро принимает квазиакустический характер, а также из-за иных условий отражения на твердой поверхности, эффекты отражения, направленности выражены слабее, чем в случае ВУВ; действие УВ в воде по своему характеру близко к гидростатическому давлению, действующему одинаково по всем направлениям.

Затухание ударных волн в воде происходит медленнее чем в воздухе, поэтому при одинаковых приведенных расстояниях, как давление, так и импульсы УВ в воде значительно больше, чем на воздухе.

Так, например, давление отражения в воде может быть приближенно оценено по формуле

$$\Delta P_{\text{отр}} = \frac{500}{R},$$

где $\bar{R} = \frac{R}{\sqrt[3]{C_{\text{ЭКВ}}}}$.

Величина импульса отражения УВ в воде может быть подсчитана по приближенной формуле

$$J = 930 \frac{C_{\text{ЭКВ}}^{2/3}}{R} \text{ кг} \cdot \text{с/м}^2.$$

Поскольку на воздухе $J = (50 \div 60) \frac{C_{\text{ЭКВ}}^{2/3}}{R}$, то при одинаковых R и $C_{\text{ЭКВ}}$ импульс в воде примерно в 15–20 раз больше, чем на воздухе.

Приведенные выше формулы относились к однородной водной среде. Если заряд находится неподалеку от поверхности воды, то значения давления и импульса могут существенно снизиться.

При взрыве заряда неподалеку от поверхности воды на ней образуется купол и затем происходит выброс, причем может сформироваться водяной столб значительной высоты. Исследованиям установлено, что образование купола и выброс связаны преимущественно с воздействием газового пузыря.

7.4. Экспериментальные исследования в области взрывов

Основные методы исследования подводного и воздушного взрыва аналогичны. Для исследований подводного взрыва также целесообразно пользоваться методом, дающим запись $p(t)$, особенно в сложных условиях, при взрыве близ поверхности воды.

Взрывные процессы протекают, как правило, при больших давлениях и высоких температурах, когда существенно изменяются привычные свойства вещества. В связи с этим исследования в этой области связаны со значительными трудностями. Давление при детонации мощных зарядов ВВ большой плотности достигает сотен тысяч атмосфер; при отражении детонационных волн и их столкновении величина давления дополнительно

возрастает. В некоторых специальных условиях, в частности при формировании кумулятивной струи, давление может достигать нескольких миллионов атмосфер. К этому нужно добавить, что взрывные процессы весьма кратковременны и параметры, характеризующие состояние вещества, крайне быстро меняются. Так, в частности, время химического превращения во фронте УВ при детонации у мощных чувствительных ВВ составляет порядка 10^{-7} и меньше. Для исследования взрывов используются зеркальные фоторегистры и лупы времени со значительным разрешением во времени, искровые и теневые устройства, спектроскопические методы исследования, осциллографы с датчиками, в том числе осциллографы с высоким разрешением во времени, электронно-оптические преобразователи, импульсная рентгеновская съемка и т. д.

Вопрос о разрушительном действии УВ в воде достаточно сложен, особенно если речь идет о действии взрыва на корабли; УВ в воде действует на стену, за которой находится другая среда (не вода, а воздух). Теория действия УВ для таких случаев весьма сложна.

8. ТЕОРИИ ВЗРЫВА

8.1. Теория теплового взрыва

Теория теплового взрыва занимает особое место в науке о горении и взрыве. Работа Н.Н. Семенова, опубликованная в 1928 г., в которой впервые были рассчитаны критические условия теплового взрыва, признана первой количественной теорией в области горения и явилась родоначальницей не только теории теплового взрыва, но и всей современной теории горения [12, 13].

Классическая теория теплового взрыва разрабатывалась применительно к газовым системам, поэтому ряд вопросов, отражающих специфику конденсированных веществ, вообще не рассматривался. Толчком к развитию теории теплового взрыва конденсированных систем явилось создание атомной и ракетной техники. Расчет критических условий теплового взрыва и периода индукции был крайне актуален с точки зрения техники безопасности технологических процессов производства взрывчатых веществ и ракетных топлив, а также их транспортировки и применения. Возникла необходимость учета различных физико-химических процессов, сопровождающих химическое превращение конденсированных систем, сложных условий теплообмена на границе, возможности автокатализа реакции конечным продуктом, конвективного теплообмена по реагирующему веществу (в случае, если оно находится в жидкой фазе) и др.

Широкое применение газовых систем в технологических и энергетических установках явилось стимулом для развития цепно-тепловой теории и теории теплового взрыва в пористых и проточных системах. Изучение воспламенения таких систем важно не только для химической технологии широкого круга веществ, но и для обеспечения безопасности хранения и сушки зерна и зернопродуктов, угля и торфа, продуктов переработки лесной и целлюлозно-бумажной промышленности, предотвращения взрывов в шахтах и т. п. Необходимость обеспечения безопасности при работе с дисперсными взрывчатыми и энергоемкими материалами повлияла на развитие исследований по очаговому тепловому взрыву и тепловому взрыву одиночных частиц и газовзвесей.

Основные проблемы математического моделирования процесса теплового взрыва связаны с представлением источника тепловыделения (сильная нелинейность, наличие системы уравнений в случае сложных реакций, трудности моделирования образования продуктов в ходе реакции и т. п.) и описанием процесса тепломассопереноса в случае сложной гетерогенной системы. С использованием ЭВМ были рассмотрены переход от самовоспламенения к зажиганию, очаговый тепловой взрыв, динамические режимы теплового взрыва, тепловой взрыв в потоке и при наличии свободной конвекции и др.

Послеиндукционные процессы. В последнее время появилось значительное количество работ, в которых приводятся результаты по высокотемпературному синтезу в режиме теплового взрыва. Для понимания механизма осуществления синтеза важно знать, как протекает послеиндукционный процесс – в режиме самораспространения или объемного горения. Исследования показали, что область существования и особенности режима распространения волны горения самым существенным образом зависят от условий теплообмена на границе. Эти исследования показали, что самораспространяющийся высокотемпературный синтез осуществляется не только при поверхностном (зажигание), но и при объемном (тепловой взрыв) инициировании. Представляется интересным рассмотреть протекание теплового взрыва в послеиндукционный период для сложных стадийных реакций, для вырожденных режимов, для условий линейного нагрева и т. д. Очень важно понимать, как тот или иной режим процесса влияет на состав и свойства образующихся продуктов.

Тепловой взрыв газопроницаемых гетерогенных систем. Для химической технологии и техники безопасности весьма важным является рассмотрение приводящих к самовоспламенению процессов нестационарного тепло- и массопереноса в пористой системе, способной к экзотермическому взаимодействию с газообразным реагентом. Представляют практический интерес также процессы теплового воспламенения горючей смеси в инертной пористой среде. Очевидно, что решение соответствующих задач в полной физической постановке (учет газодинамических аспектов, различия температуры каркаса пористой среды и газа, реальной кинетики высокотемпературного взаимодействия и т. п.) представляет значительные трудности, поэтому имеющиеся в литературе результаты зачастую получены с довольно существенными допущениями.

Во многих технологических и природных ситуациях гетерогенные системы находятся в условиях непрерывного изменения температуры окружающей среды. Для понимания и количественного описания такого рода процессов требуется развитие таких разделов теории как переход от самовоспламенения к зажиганию, вырождение теплового взрыва в динамических условиях и т. п.

Следует отметить, что дополнительные трудности при математическом моделировании теплового взрыва гетерогенных систем возникают вследствие того, что высокотемпературное взаимодействие компонентов сопровождается сложными физическими явлениями (испарение, плавление, нарастание пленки продукта, капиллярное растекание и т. п.) различными для различных систем.

Тепловой взрыв при совместном проявлении химического превращения и физических воздействий. Для явления теплового взрыва характерно выделение тепла, скорость которого экспоненциально возрастает

с температурой, и потери тепла, зависящие от разности температур в теле и окружающей среде. В теории обычно рассматривают источники тепловыделения, связанные с химическими превращениями и именно в химии явление теплового взрыва имеет широкое распространение. В то же время известно, что условия, необходимые для теплового взрыва, могут возникать при протекании других, чисто физических процессов как за счет выделения внутренней энергии, запасенной в веществе, так и благодаря диссипации энергии внешнего воздействия. При этом картина теплового взрыва типична для всех процессов – прогрессивно возрастающий саморазогрев для одних ситуаций и слабый саморазогрев для других; наличие критических условий по параметрам, характеризующим процесс. Перспективным является изучение теплового взрыва при совместном проявлении химического превращения и физических воздействий.

Примером такого рассмотрения является электротепловой взрыв (электрохимический тепловой взрыв), в котором изучается процесс совместного выделения энергии электрического тока и химического превращения. Оказалось, что при осуществлении ЭТВ удастся добиться равномерного распределения температуры при весьма высоких темпах нагрева (10^2 – 10^5 К/с), это представляет удобство для неизотермических кинетических исследований, так как существенно упрощает обработку получаемых из эксперимента данных.

Цепно-тепловой взрыв. Одно из важных теоретических направлений – совместное рассмотрение цепных и тепловых процессов. Это сложная задача из-за разнообразия кинетических законов, а также из-за наличия двух видов самоускорения: цепного и теплового. Проводимые исследования являются продолжением основополагающих семеновских работ на современном уровне.

Основные результаты получены на упрощенной кинетической модели (в системе действуют два активных центра, учитываются акты зарождения, продолжения, разветвления и обрыва цепей со взаимным превращением активных центров). Основной вывод исследований – хорошо известный в цепной теории полуостров воспламенения (в координатах температура-давление) неоднороден. В части, примыкающей к первому пределу, реакция протекает полностью почти изотермически, возникающий тепловой взрыв не переходит в тепловой. Для части полуострова, примыкающей ко второму пределу, цепной взрыв инициирует тепловой. Внутри полуострова имеет место граница, четко выражающая критическое условие теплового взрыва. Этот вывод был подтвержден экспериментально на примере цепной реакции окисления водорода. В дальнейшем по той же кинетической модели были получены аналитические выражения для критических условий цепного и теплового самовоспламенения, максимальных предвзрывных разогревов, изучено влияние кинетических параметров на критические

условия теплового и цепного воспламенения, обнаружен и исследован полуостров теплового воспламенения. Правильность полученных результатов подтверждена экспериментально на исследованиях реакций окисления и фторирования водорода, а также оксида углерода.

Теория цепно-теплового взрыва находится в стадии активного развития, и одной из ее основных задач является совершенствование кинетических моделей.

Тепловой взрыв одиночных частиц и газовзвесей. Тепловой взрыв одиночных частиц изучен довольно подробно, особенно для случаев частицы взрывчатого вещества в активном газе и металла в газообразном окислителе. Закономерности теплового взрыва совокупностей частиц изучены менее подробно и, в связи с большой прикладной значимостью таких исследований, по всей вероятности, в ближайшие годы они будут активно продолжаться с акцентом на рассмотрение нестационарных задач с пространственным распределением температуры.

8.2. Теория зажигания

Вынужденное воспламенение (зажигание). Локальный (местный) нагрев – основной признак процесса самоускорения химической реакции (воспламенения), который относится к зажиганию.

Существуют различные способы зажигания:

- накалившее тело;
- локальное пламя;
- электрическая искра (различные типы);
- трение;
- лазерное излучение;
- горячие струи, рециркуляция нагретых продуктов горения;
- самовоспламеняющиеся жидкости (пары $H_2 + F_2$).

Как и для самовоспламенения, важны условия самоускорения (преобладания Q_+ над Q_-), но с точки зрения математики расчет вести значительно сложнее. Критерием зажигания должно являться не только появление пламени, но и его распространение.

Общий критерий зажигания должен включать в себя не только условия самоускорения химической реакции, но и условия последующего распространения пламени. Поэтому теория зажигания значительно сложнее теории самовоспламенения.

Рассмотрим предельное (необходимое) критическое условие зажигания (рис. 8.1).

Пусть на поверхности тела произошло повышение температуры до T_1 . В инертной, не способной к реакции среде, распределение температуры изображается кривой T_1A_1 . В реакционно-способной среде кривая T_1A_1' .

Повысим начальную температуру до T_2 . В инертной среде распределение температур соответствует кривой T_2A_2 . В реагирующей среде с повышением температуры увеличивается выделение тепла, кривая температур будет падать медленнее, чем T_2A_2 и, кривая температур примет вид T_2A_2' .

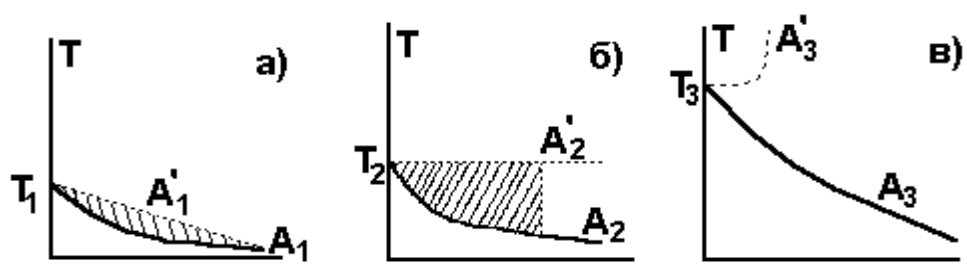


Рис. 8.1. Критическое условие зажигания (по Вант-Гоффу) $T_3 > T_2 > T_1$

Если повысить температуру источника до $T_3 > T_2$, то стационарное состояние в этом случае невозможно и температура в среде начнет быстро расти – кривая T_3A_3' . Тогда, критическое условие зажигания по Зельдовичу:

$$\left(\frac{dT}{dn} \right)_{cm} = 0,$$

где n – нормаль к поверхности, dT – градиент температур поверхности нагретого–раскаленного тела.

Смысл критерия заключается в следующем: с момента достижения температуры T_3 тело не участвует более в процессе (тепловой поток от него равен нулю) и определяющим являются условия в слое газа, находившемся в контакте с телом (запас тепла).

Особые условия, отличающие зажигание от самовоспламенения:

- температура зажигания значительно превосходит температуру самовоспламенения $T_3 \gg T_{св}$;
- существенно влияет условие теплоотвода;
- вследствие влияния выгорания необходимы каталитические свойства поверхности тела;
- чем меньше размеры источника, тем выше критическая температура;
- самоускорение реакции присутствует, а распространение – нет.

Искровое зажигание. Экспериментальные характеристики зажигания. *Искровое зажигание* – самый распространенный вид зажигания. Его механизм сложен, так как имеет место очень интенсивная местное возбуждение молекул газа и их ионизация.

Появление искры оказывает следующее влияние:

- изменяет протекание химических процессов в области искры, значит, меняются критические условия;
- сильно повышает температуру газа в области искры (искра – накалившееся газообразное тело).

Существуют две теории искрового зажигания: ионная теория (активные химические частицы) искрового зажигания и тепловая теория.

Зажигание зависит от следующих параметров: температуры искры, давления смеси, плотности теплового потока, энергии искры, времени существования искры.

Для каждой смеси существует некоторая предельная минимальная мощность искры, начиная с которой смесь воспламеняется (рис. 8.2).

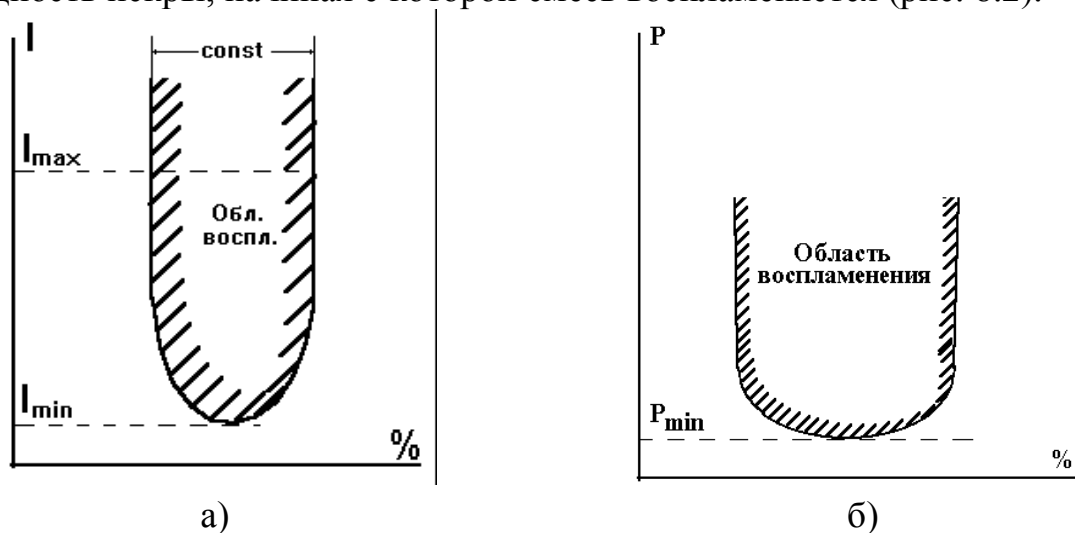


Рис. 8.2. Влияние мощности искры и давления на область воспламенения смеси: а – зависимость минимальной мощности искры от процентного состава смеси; б – зависимость границ зажигания от давления

Искру, при которой критические условия зажигания оказываются не зависящими от дальнейшего возрастания ее мощности, принято называть насыщенной искрой $I_{\max}$ (см. рис. 8.2 а).

Теоретическая зависимость времени зажигания к-систем от мощности искры представлена на рис. 8.3.

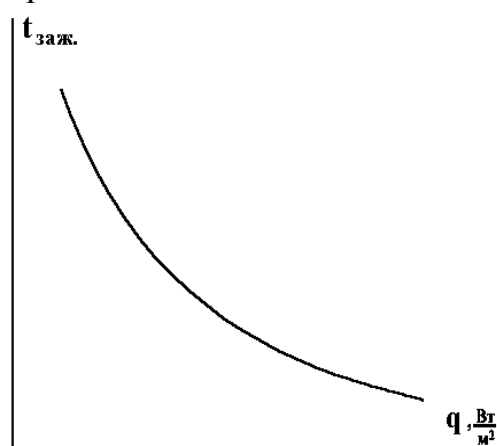


Рис. 8.3. Теоретическая зависимость времени зажигания от мощности искры

8.3. Физические и химические взрывы

Взрывы классифицируют:

- на химические;
- на физические:
 - взрывы емкостей под давлением (баллоны, паровые котлы);
 - взрывы при сбросе давления в перегретых жидкостях;
 - взрывы при смешивании двух жидкостей, температура одной из которых намного превышает температуру кипения другой;
 - кинетические (падение метеоритов);
 - ядерные;
 - электрические (например, при грозе).

Химические взрывы. Единого мнения о том, какие именно химические процессы следует считать взрывом, не существует. Это связано с тем, что высокоскоростные процессы могут протекать в виде детонации или дефлаграции (горения). Детонация отличается от горения тем, что химические реакции и процесс выделения энергии идут с образованием ударной волны в реагирующем веществе, и вовлечение новых порций взрывчатого вещества в химическую реакцию происходит на фронте ударной волны, а не путем теплопроводности и диффузии, как при горении. Как правило, скорость детонации выше скорости горения, однако это не является абсолютным правилом. Различие механизмов передачи энергии и вещества влияют на скорость протекания процессов и на результаты их действия на окружающую среду, однако на практике наблюдаются самые различные сочетания этих процессов и переходы детонации в горение и обратно. В связи с этим обычно к химическим взрывам относят различные быстропротекающие процессы без уточнения их характера.

Существует более жесткий подход к определению химического взрыва как исключительно детонационному. Из этого условия с необходимостью следует, что при химическом взрыве, сопровождаемом окислительно-восстановительной реакцией (сгоранием), сгорающее вещество и окислитель должны быть перемешаны, иначе скорость реакции будет ограничена скоростью процесса доставки окислителя, а этот процесс, как правило, имеет диффузионный характер. Например, природный газ медленно горит в горелках домашних кухонных плит, поскольку кислород медленно попадает в область горения путем диффузии. Однако если перемешать газ с воздухом, он взорвется от небольшой искры – объемный взрыв.

Индивидуальные взрывчатые вещества, как правило, содержат кислород в составе своих собственных молекул, притом, их молекулы, по сути, метастабильные образования. При сообщении такой молекуле достаточной энергии (энергии активации) она самопроизвольно диссоциирует на составляющие атомы, из которых образуются продукты взрыва, с выделением энергии, превышающей энергию активации. Подобными свойствами

обладают молекулы нитроглицерина, тринитротолуола и др. Нитраты целлюлозы (бездымный порох), черный порох, который состоит из механической смеси горючего вещества (древесный уголь) и окислителя (различные селитры), в обычных условиях не склонны к детонации, но их по традиции относят к взрывчатым веществам.

Ядерный взрыв – неуправляемый процесс высвобождения большого количества тепловой и лучистой энергии в результате цепной ядерной реакции деления или реакции термоядерного синтеза за очень малый промежуток времени. По своему происхождению ядерные взрывы являются либо продуктом деятельности человека на Земле и в околоземном космическом пространстве, либо природными процессами на некоторых видах звезд. Искусственные ядерные взрывы – мощное оружие, предназначенное для уничтожения крупных объектов и скоплений войск противника, но также могут иметь мирное применение – для перемещения больших масс грунта при строительстве, обрушения препятствий в горах, научных исследований в сейсмологии. В последнее время рассматривается возможность разрушения или изменения орбиты астероидов, угрожающих столкновением с Землей, путем ядерного взрыва в его окрестности.

Атомные ядра некоторых изотопов химических элементов с большой атомной массой (например, урана или плутония) при их облучении нейтронами определенной энергии теряют свою устойчивость и распадаются с выделением энергии на два меньших и приблизительно равных по массе осколка – происходит реакция деления атомного ядра. При этом наряду с осколками, обладающими большой кинетической энергией, выделяются еще несколько нейтронов, которые способны вызвать аналогичный процесс в соседних таких же атомах. В свою очередь, нейтроны, образовавшиеся при их делении, могут привести к делению дополнительного количества атомов расщепляющего материала – реакция становится цепной, приобретает каскадный характер. В зависимости от внешних условий, количества и чистоты расщепляющегося материала ее течение может происходить по-разному. Если вследствие вылета нейтронов из зоны деления или их поглощения атомными ядрами без последующего деления число расщепленных ядер в последующей стадии цепной реакции меньше чем в предыдущей, то происходит ее затухание. При равном числе расщепленных ядер в обеих стадиях цепная реакция становится самоподдерживающейся, а в случае превышения количества расщепленных ядер в каждой последующей стадии в реакцию вовлекаются все новые атомы расщепляющегося вещества. Если такое превышение является многократным, то в ограниченном объеме за очень короткий промежуток времени образуется большое количество атомных ядер-осколков деления, электронов, нейтронов и квантов электромагнитного излучения с очень высокой кинетической энергией. Единственно возможной формой их существования являет-

ся агрегатное состояние высокотемпературной плазмы, в сгусток которой превращается весь расщепляющийся материал и любое другое вещество в его окрестности. Этот сгусток не может быть сдержан в своем первоначальном объеме и стремится перейти в равновесное состояние путем расширения в окружающую среду и теплообмена с ней. Поскольку скорость упорядоченного движения составляющих сгусток частиц много выше скорости звука как в нем, так и в окружающей его среде (если это не вакуум), расширение не может иметь плавного характера и сопровождается образованием ударной волны – то есть носит характер взрыва.

В отличие от атомных реакций деления, реакции термоядерного синтеза с выделением энергии возможны только среди элементов с небольшой атомной массой, не превышающих приблизительно атомную массу железа. Они не носят цепного характера и возможны только при высоких температурах, когда кинетической энергии сталкивающихся атомных ядер достаточно для преодоления кулоновского барьера отталкивания между ними, либо для заметной вероятности их слияния за счет действия туннельного эффекта квантовой механики. Чтобы сделать возможным такой процесс, необходимо совершить работу для разгона исходных атомных ядер до высоких скоростей, но если они сольются в новое ядро, то выделившаяся при этом энергия будет больше, чем затраченная. Появление нового ядра в результате термоядерного синтеза как правило сопровождается образованием различного рода элементарных частиц и высокоэнергетичных квантов электромагнитного излучения. Наряду со вновь образовавшимся ядром все они имеют большую кинетическую энергию, то есть в реакции термоядерного синтеза происходит преобразование внутриядерной энергии сильного взаимодействия в тепловую. Как следствие, в итоге результат оказывается тот же, что и в случае цепной реакции деления – в ограниченном объеме образуется сгусток высокотемпературной плазмы, расширение которого в окружающей плотной среде имеет характер взрыва.

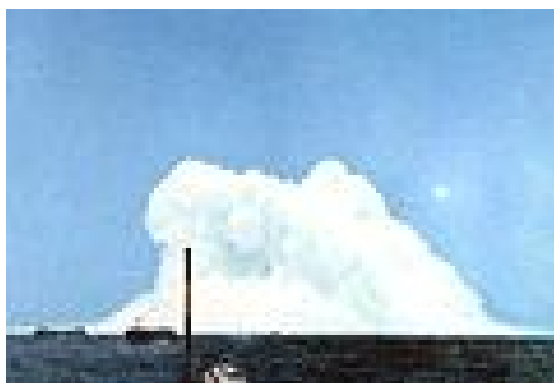
Искусственные ядерные взрывы обычно классифицируют по двум признакам: мощности заряда, инициировавшего взрыв, и местоположению точки нахождения заряда в момент подрыва (центр ядерного взрыва). Мощность ядерного взрыва измеряется в так называемом тротиловом эквиваленте – массе тринитротолуола, при химическом взрыве которого выделяется столько же энергии, сколько при оцениваемом ядерном. Наиболее часто используемыми единицами измерения мощности ядерного взрыва служат 1 килотонна (кт) или 1 мегатонна (Мт) тротилового эквивалента. Принятая классификация характеризует мощность ядерного взрыва как:

- сверхмалую (менее 1 кт);
- малую (от 1 до 10 кт) – на движущейся картинке справа;
- среднюю (от 10 до 100 кт);
- большую (от 100 кт до 1 Мт);
- сверхбольшую (более 1 Мт).

Взрыв мощностью 20 кт дает зону полных разрушений радиусом около 1 км, 20 Мт – уже 10 км. По расчетам, при взрыве мощностью 100 Мт зона полного разрушения будет иметь радиус около 35 км, сильных разрушений – около 50 км, на расстоянии около 80 км незащищенные люди получают ожоги третьей степени. Практически одним таким взрывом может быть полностью уничтожен любой из самых крупных городов Земли.

По местонахождению центра ядерные взрывы подразделяют на (рис. 8.4):

- атмосферные:
 - взрывы в приземном слое;
 - высотные взрывы;
- экзоатмосферные (в космическом пространстве);
- наземные;
- подземные:
 - на малой глубине (происходит выброс грунта и образуется кратер);
 - на большой глубине (образуется замкнутая полость в глубине);
- наводные;
- подводные:
 - на малой глубине (происходит выброс воды);
 - на большой глубине (образуется пузырь в глубине).



Подводный взрыв на глубине 660 м

Подземный взрыв на малой глубине

Рис. 8.4. Виды взрывов

Высокоэнергичные гамма-кванты от ядерного взрыва, проходя через окружающую среду, ионизуют ее атомы, выбивая из них электроны и сообщая им достаточно большую энергию для каскадной ионизации других атомов, вплоть до 30000 ионизаций на один гамма-квант. В результате под эпицентром ядерного взрыва остается «пятно» положительно заряженных ионов, которые окружены гигантским количеством электронного газа.

В процессе рекомбинации порождаются сильные электрические токи, служащие дополнительным источником электромагнитного излучения. Весь этот комплекс явлений называется электромагнитным импульсом, и хотя в него уходит менее трети десятиллиардной доли энергии взрыва,

происходит он за очень короткое время и выделяющаяся при этом мощность может достигать 100 ГВт.

Наземный ядерный взрыв в отличие от обычного имеет свои особенности. При химическом взрыве температура грунта, примыкавшего к заряду и вовлеченного в движение относительно невелика. При ядерном взрыве температура грунта возрастает до десятков миллионов градусов и большая часть энергии нагрева в первые же мгновения излучается в воздух и дополнительно идет в образование теплового излучения и ударной волны, чего при обычном взрыве не происходит. Отсюда резкое различие в воздействии на поверхность и грунтовый массив: наземный взрыв химического взрывчатого вещества передает в грунт до половины своей энергии, а ядерный – считанные проценты. Соответственно размеры воронки и энергия сейсмических колебаний от ядерного взрыва в разы меньше оных от одинакового по мощности взрыва ВВ. Однако при заглублении зарядов это соотношение сглаживается, так как энергия перегретой плазмы меньше уходит в воздух и идет на совершение работы над грунтом.

Начиная с определенного момента, скорость перемещения скачка давления становится больше скорости расширения огненного шара, ударная волна полностью сформировалась и отрывается от огненного шара, унося значительную долю энергии ядерного взрыва. Вихрь поднятой пыли и частиц грунта с земли стремится к огненному шару, образуя ножку «ядерного гриба». В считанные минуты развивается полное грибовидное облако, продолжающее расти в высоту и в диаметре; огненный шар исчезает. После выравнивания температур и давлений подъем пыли и частиц с земли прекращается, ножка «гриба» истончается и исчезает, его «шляпка» превращается в темное облако, которое после своего охлаждения может выпасть осадками и окончательно исчезнуть.

«Ядерный гриб» представляет собой сильно развитое кучево-дождевое облако необычной формы с очень большим вертикальным развитием (вершина достигает высоты 15–20 км и более). Из «ядерных» кучево-дождевых облаков выпадают сильные ливневые дожди, которые тушат значительную часть наземных пожаров, возникших в результате взрыва.

Применение ядерных взрывов. Огромная разрушительная мощь ударной волны и светового излучения от ядерного взрыва сразу же привлекла к нему внимание военных.

Ядерное оружие существенным образом изменило культурное восприятие глобальной войны и политическую расстановку сил. Страна, обладающая ядерным оружием и подтвердившая его наличие тестовым ядерным взрывом сильно снижает угрозу внешней агрессии, что является для многих национальной безопасностью. Вместе с тем, возможность случайного возникновения конфликта в результате аварии, недоразумения, ошибки или диверсии пока недостаточно изучена.

В истории человечества ядерное оружие в боевых военных целях применялось дважды – 6 и 9 августа 1945 года США нанесли последовательно два ядерных удара по японским городам Хиросима и Нагасаки, уничтожив в общей сложности свыше 200 000 человек и инфраструктуру этих городов, практически полностью сокрушив любые иллюзии населения и, особенно, руководства Японии о военном успехе во Второй мировой войне. В США и СССР впоследствии неоднократно проводились войсковые учения с производством ядерных взрывов. В результате были выработаны методики и поставлена на вооружение техника, которая позволяет войскам успешно выполнять боевые задачи в условиях применения ядерного оружия.

Ядерный взрыв нашел и несколько мирных ниш применения. Принято считать, что в общей сложности в США было проведено 27, а в СССР, в период с 1965 по 1988 годы – 135 ядерных взрывов невоенной направленности (из них 124 – непосредственно по программе ядерных взрывов в мирных целях, остальные – испытательные) с целью изучения возможностей по такому применению. Основные сферы применения ядерных взрывов в мирных целях следующие.

- Быстрое рытье крупных котлованов для искусственных водохранилищ. Котлован создается с помощью подповерхностного подземного ядерного или термоядерного взрыва «на выброс». Достоинства метода: получившаяся емкость имеет большую глубину, оплавленные стенки и небольшую поверхность зеркала водоема. Все это минимизирует потери воды на испарение и фильтрацию в грунт. Предполагалось использовать такие искусственные резервуары в засушливых районах для хранения воды для нужд сельского хозяйства.

- Создание подземных емкостей (в частности, газохранилищ и резервуаров для захоронения опасных отходов). Одним взрывом создается полость объемом в десятки тысяч кубических метров.

- Тушение масштабных пожаров на газовых месторождениях.

- Выемка грунта и разрушение препятствий при строительстве крупномасштабных сооружений на местности (каналы).

- Интенсификация добычи полезных ископаемых: дробление руд, воздействие на породы в районах месторождений для повышения продуктивности добычи и для снижения опасности аварий.

- Сейсморазведка – изучение внутреннего строения Земли путем регистрации ударных волн от ядерных взрывов. Применялось, в том числе, и для поиска месторождений полезных ископаемых.

В последнее время нагнетаемый прессой страх перед последствиями столкновения астероида с Землей (что само по себе эквивалентно сверхмощному ядерному взрыву без радиоактивного заражения) привел к появлению проектов, использующих ядерные взрывы для ликвидации или отклонения опасных астероидов.

8.4. Кавитация

Кавитация – (от лат. *cavitas* – пустота) – образование в жидкости полостей (кавитационных пузырьков, или каверн), заполненных газом, паром или их смесью. Кавитация возникает в результате местного понижения давления в жидкости, которое может происходить либо при увеличении ее скорости (гидродинамическая кавитация), либо при прохождении акустической волны большой интенсивности во время полупериода разрежения (акустическая кавитация), существуют и другие причины возникновения эффекта. Перемещаясь с потоком в область с более высоким давлением или во время полупериода сжатия, кавитационный пузырек захлопывается, излучая при этом ударную волну [11].

Кавитация разрушает поверхность гребных винтов, гидротурбин, акустических излучателей и др.

Согласно определению Кристофера Бреннена: «Когда жидкость подвергается давлению ниже порогового (напряжению растяжения), тогда целостность ее потока нарушается, и образуются парообразные полости. Это явление называется кавитацией. Когда местное давление жидкости в некоторой точке падает ниже величины, соответствующей давлению насыщения при данной окружающей температуре, тогда жидкость переходит в другое состояние, образуя, в основном, фазовые пустоты, которые называются кавитационными пузырями. Возможно и другое образование кавитационных пузырей путем местной подачи энергии. Это может быть достигнуто фокусировкой интенсивного лазерного импульса (оптическая кавитация) или искрой электрического разряда».

Во многих источниках физика этого явления объясняется следующим образом. Физический процесс кавитации близок процессу закипания жидкости. Основное различие между ними заключено в том, что при закипании изменение фазового состояния жидкости происходит при среднем по объему жидкости давлении равном давлению насыщенного пара, тогда как при кавитации среднее давление жидкости выше давления насыщенного пара, а падение давления носит локальный характер. Однако более поздние исследования показали, что ведущую роль в образовании пузырьков при кавитации играют газы, выделяющиеся внутрь образующихся пузырьков. Эти газы всегда содержатся в жидкости, и при местном снижении давления начинают интенсивно выделяться внутрь указанных пузырьков.

Поскольку под воздействием переменного местного давления жидкости пузырьки могут резко сжиматься и расширяться, то температура газа внутри пузырьков колеблется в широких пределах, и может достигать нескольких сот градусов по Цельсию. Имеются расчетные данные, что температура внутри пузырьков может достигать 1500 градусов Цельсия. Следует также учитывать, что в растворенных в жидкости газах содержится больше кислорода в процентном отношении, чем в воздухе, и поэтому газы

в пузырьках при кавитации химически более агрессивны, чем атмосферный воздух (рис. 8.5, 8.6).



Рис. 8.5 Повреждения, наносимые эффектом кавитации (часть насоса)



Рис. 8.6. Кавитационные повреждения гребного винта

Химическая агрессивность газов в пузырьках, имеющих к тому же высокую температуру, вызывает эрозию материалов, с которыми соприкасается жидкость, в которой развивается кавитация. Эта эрозия и составляет один из факторов вредного воздействия кавитации. Второй фактор обусловлен большими забросами давления, возникающими при схлопывании пузырьков и воздействующими на поверхности указанных материалов.

Поэтому кавитация во многих случаях нежелательна. Например, она вызывает разрушение гребных винтов судов, рабочих органов насосов, гидротурбин и т. п., кавитация вызывает шум, вибрации и снижение эффективности работы.

Когда схлопываются кавитационные пузыри, энергия жидкости сосредотачивается в очень небольших объемах. Тем самым, образуются места повышенной температуры и возникают ударные волны, которые являются источниками шума. Шум, создаваемый кавитацией, является особой проблемой на подводных лодках (субмаринах), так как из-за шума их могут обнаружить. При разрушении каверн освобождается много энергии, что может вызвать повреждения. Эксперименты показали, что вредному, разрушительному воздействию кавитации подвергаются даже химически инертные к кислороду вещества (золото, стекло и др.), хотя и намного более медленно. Это доказывает, что помимо фактора химической агрессивности газов, находящихся в пузырьках, важным является также фактор забросов давления, возникающих при схлопывании пузырьков. Кавитация ведет к большому износу рабочих органов и может значительно сократить срок службы винта и насоса. В метрологии, при использовании ультразвуковых расходомеров, кавитационные пузыри модулируют волны, излучаемые расходомером, что приводит к искажению его показаний.

Хотя кавитация нежелательна во многих случаях, есть исключения. Например, сверхкавитационные торпеды, используемые военными, обволакиваются в большие кавитационные пузыри. Существенно уменьшая контакт с водой, эти торпеды могут передвигаться значительно быстрее, чем обыкновенные торпеды.

Кавитация может быть полезной при ультразвуковой очистке устройств. Эти устройства создают кавитацию, используя звуковые волны и разрушение кавитационных пузырей для чистки поверхности. Таким образом, потребность в очистке от вредных химических веществ может быть уменьшена во многих промышленных и коммерческих процессах, где требуется очистка как этап производства. До сих пор подробности того, как пузыри производят очистку, до конца не поняты.

В промышленности кавитация часто используется для гомогенизации (смешивания) и отсадки взвешенных частиц в коллоидном жидкостном составе, например, смеси красок или молока. Многие промышленные смесители основаны на этом принципе. Также были разработаны кавитационные водные устройства очистки, в которых граничные условия кавитации могут уничтожить загрязняющие вещества и органические молекулы. Кавитационные процессы имеют высокую разрушительную силу, которую используют для дробления твердых веществ, которые находятся в жидкости. Одним из применений таких процессов является измельчение твердых включений в тяжелые топлива, что используется для обработки котельного топлива с целью увеличения калорийности его горения.

Кавитационные устройства снижают вязкость углеводородного топлива, что позволяет снизить необходимый нагрев и увеличить дисперсность распыления топлива.

Наилучшим методом предотвращения вредных последствий кавитации для деталей машин считается изменение их конструкции таким образом, чтобы предотвратить образование полостей либо предотвратить разрушение этих полостей возле поверхности детали. При невозможности изменения конструкции могут применяться защитные покрытия, например, газотермическое напыление сплавов на основе кобальта.

В системах гидропривода часто используют системы подпитки. Они, упрощенно говоря, представляют собой дополнительный насос, жидкость от которого начинает поступать через специальный клапан в гидросистему, когда в последней давление падает ниже допустимого значения. Если давление в гидросистеме не опускается ниже допустимого, жидкость от дополнительного насоса идет на слив в бак. Системы подпитки установлены, например, во многих экскаваторах.

Кавитационное течение характеризуется безразмерным параметром (числом кавитации):

$$X = \frac{2(P - P_s)}{\rho V^2},$$

где P – гидростатическое давление набегающего потока, Па; P_s – давление насыщенных паров жидкости при определенной температуре окружающей среды, Па; ρ – плотность среды, кг/м³; V – скорость потока на входе в систему, м/с.

Известно, что кавитация возникает при достижении потоком граничной скорости $V = V_c$, когда давление в потоке становится равным давлению парообразования (насыщенных паров). Этой скорости соответствует граничное значение критерия кавитации.

В зависимости от величины X можно различать четыре вида потоков:

- 1) докавитационный – сплошной (однофазный) поток при $X > 1$,
- 2) кавитационный – (двухфазный) поток при $X \sim 1$,
- 3) пленочный – с устойчивым отделением кавитационной полости от остального сплошного потока (пленочная кавитация) при $X < 1$,
- 4) суперкавитационный – при $X \ll 1$.

Уровень кавитации измеряют в относительных единицах с помощью приборов, называемых кавитометрами.

8.5. Искровой разряд

Искровой разряд (искра электрическая) – нестационарная форма электрического разряда, происходящая в газах. Такой разряд возникает обычно при давлениях порядка атмосферного и сопровождается характерным звуковым эффектом – «треском» искры. Температура в главном канале искрового разряда может достигать 10 000 К. В природе искровые разряды часто возникают в виде молний. Чтобы образовалась искра напряжение разряда должно быть от 10 000 вольт и больше.

Искровой разряд обычно происходит, если мощность источника энергии недостаточна для поддержания стационарного дугового разряда или тлеющего разряда. В этом случае одновременно с резким возрастанием разрядного тока напряжение на разрядном промежутке в течение очень короткого времени (от несколько микросекунд до нескольких сотен микросекунд) падает ниже напряжения погасания искрового разряда, что приводит к прекращению разряда. Затем разность потенциалов между электродами вновь растет, достигает напряжения зажигания и процесс повторяется. В других случаях, когда мощность источника энергии достаточно велика, также наблюдается вся совокупность явлений, характерных для этого разряда, но они являются лишь переходным процессом, ведущим к установлению разряда другого типа – чаще всего дугового. Если источник тока не способен поддерживать самостоятельный электрический разряд в течение длительного времени, то наблюдается форма самостоятельного разряда, называемая искровым разрядом.

Искровой разряд представляет собой пучок ярких, быстро исчезающих или сменяющих друг друга нитевидных, часто сильно разветвленных полосок – искровых каналов. Эти каналы заполнены плазмой, в состав которой в мощном искровом разряде входят не только ионы исходного газа, но и ионы вещества электродов, интенсивно испаряющегося под действием разряда. Механизм формирования искровых каналов (и, следовательно,

возникновения искрового разряда) объясняется стримерной теорией электрического пробоя газов. Согласно этой теории, из электронных лавин, возникающих в электрическом поле разрядного промежутка, при определенных условиях образуются стримеры – тускло светящиеся тонкие разветвленные каналы, которые содержат ионизированные атомы газа и отщепленные от них свободные электроны. Среди них можно выделить т. н. лидер – слабо светящийся разряд, «прокладывающий» путь для основного разряда. Он, двигаясь от одного электрода к другому, перекрывает разрядный промежуток и соединяет электроды непрерывным проводящим каналом. Затем в обратном направлении по проложенному пути проходит главный разряд, сопровождаемый резким возрастанием силы тока и количества энергии, выделяющегося в них. Каждый канал быстро расширяется, в результате чего на его границах возникает ударная волна. Совокупность ударных волн от расширяющихся искровых каналов порождает звук, воспринимаемый как «треск» искры (в случае молнии – гром).

Напряжение зажигания искрового разряда, как правило, достаточно велико. Напряженность электрического поля в искре понижается от нескольких десятков киловольт на сантиметр (кВ/см) в момент пробоя до ~ 100 В/см спустя несколько микросекунд. Максимальная сила тока в мощном искровом разряде может достигать значений порядка нескольких сотен тысяч ампер.

9. МЕРЫ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ОБРАЩЕНИИ СО ВЗРЫВЧАТЫМИ ВЕЩЕСТВАМИ

9.1. Меры безопасности при хранении, транспортировке и производстве взрывчатых веществ

Меры безопасности в отношении любого взрывчатого вещества сводятся к общим правилам рационализации работы. Бездымный порох считается стабильным веществом, но, если его положить в печь, он взорвется. Пластиковое вещество – достаточно стабильное взрывчатое соединение, но перед практическим использованием его необходимо размягчить. Тринитротолуол можно поджечь так, что он сгорит, но не взорвется, тогда, как черный порох воспламеняется уже от малейшей искры.

Наиболее важное значение при размещении взрывчатых веществ имеет правильный выбор места хранения. Оно должно находиться в достаточно близких пределах для присмотра, но не столь близко, чтобы представлять опасность для окружающих. Все двери на складах для хранения взрывчатых веществ должны снабжаться надежными запорными устройствами.

Запрещается хранить: запальные капсюли механического типа, электрические капсюли или иные инициирующие приспособления в том же контейнере или, тем более, на том же складе, где размещены любые другие формы бризантных или медленно горящих взрывчатых веществ; фитили или заправку фитилей во влажном или подверженном действию испарений месте или вблизи места хранения легко воспламеняющихся веществ, например, масел, бензина или газolina, очистительных растворителей или красок. Фитили следует также размещать на удалении от радиаторов, паропроводов, печей или любых других источников тепла, так как неэлектрические фитили любого типа в силу своих свойств могут стать причиной пожара и других отрицательных последствий.

Металлы должны храниться как можно дальше от взрывчатых веществ. Металлические инструменты нельзя хранить в одном и том же складском помещении вместе со взрывчатыми веществами.

В помещении со взрывчатыми веществами нельзя допускать возникновения открытого пламени или других видов огня.

Реальную опасность при хранении взрывчатых веществ представляет возможность стихийного самовозгорания. Поэтому не допускается накопление в зоне хранения взрывчатых веществ листвы, травы, хвороста или каких-то горючих отходов.

Для разных типов взрывчатых веществ требуются соответствующие условия хранения, включая температурный режим и другие факторы, поддающиеся контролю. Производить операции со взрывчатыми соединениями в месте их хранения может только специалист, знающий свойства и особенности этих веществ.

Хранение пожаровзрывоопасных веществ и материалов. Аммиачную, натриевую и кальциевую селитру в мешках (контейнерах) допускается хранить совместно в одном хранилище окислителей, а также в одном помещении отдельными штабелями, уложенными на поддоны, или в отдельных секциях. Проезды между штабелями должны быть не менее 1,3 м, проходы – 1 м, центральные проезды – 2 м. Высота штабеля мешков (контейнеров) должна быть не более 2,6 м, ширина – не более 5 м.

В помещениях для хранения аммиачной, натриевой и кальциевой селитры, кроме хранилищ бестарного хранения бункерного и силосного типа, не допускается устройство приямков, каналов, лотков и других углублений в полу.

Помещения должны быть сухими, проникновение осадков через перекрытия и полы не допускается, должна быть предусмотрена естественная вентиляция, обеспечивающая однократный воздухообмен в час. Помещения площадью 200 м² и более должны быть оборудованы автоматической пожарной сигнализацией.

Хранилище *металлических горючих порошков* должно быть защищено от проникновения атмосферных осадков и грунтовых вод, попадания прямых солнечных лучей на штабели с банками. При высоких (35 °С и выше) летних температурах наружного воздуха хранилище в утренние или вечерние часы необходимо проветривать.

Нитрит натрия должен храниться в самостоятельных хранилищах. Совместное хранение нитрита натрия с селитрами и другими материалами не допускается. Загрузка не должна превышать 500 т. Нитрит натрия должен храниться в мешках, уложенных в штабеля.

Проектирование складов *жидких нефтепродуктов*, используемых при производстве взрывчатых материалов в качестве горючих компонентов, должно осуществляться с учетом требований строительных норм и правил.

При *транспортировке* взрывчатых веществ нужно руководствоваться федеральными законами, правилами и регулирующими нормами.

Необходимо предусмотреть, чтобы любое транспортное средство, используемое для перевозки взрывчатых веществ, находилось в нормальном эксплуатационном состоянии и было оснащено цельным и крепким деревянным или неискрящим металлическим днищем и достаточно высокими боковыми и торцевыми бортами для предотвращения случайного выпадения взрывчатых веществ из машины. Груз, помещенный в открытый кузов грузовика, должен быть прикрыт сверху водонепроницаемым и огнестойким брезентом. Проводка должна иметь на всем протяжении хорошую изоляцию для исключения возможности короткого замыкания, а в противопожарный комплект на транспортном средстве должны входить не менее двух огнетушителей. Грузовая автомашина должна быть снабжена маркировочными знаками и надписями.

Не допускается присутствия металлов любого вида, за исключением неискрящих, непосредственно в зоне взрывчатых веществ и их контактирования с облицовкой или кожухом этих химических средств. Вместе со взрывчатыми веществами запрещается перевозить металлы, легко воспламеняющиеся вещества или высококоррозионные материалы.

Категорически запрещается курить рядом с контейнером со взрывчатым веществом любого типа, независимо от степени его стабильности; приближаться посторонним лицам к взрывчатым веществам.

Загрузка или разгрузка взрывчатых веществ должна производиться с предельной осторожностью. Если транспортируются бризантные взрывчатые вещества и запальные капсюли в одном транспортном средстве, необходимо разместить указанные средства отдельно.

В целях повышения безопасности работ по производству взрывчатых веществ в организациях, поднадзорных Ростехнадзору, разработаны «Правила устройства и безопасной эксплуатации пунктов производства и механизированной подготовки к применению взрывчатых веществ в организациях, ведущих взрывные работы» [15].

Настоящие Правила распространяются на все вновь проектируемые, строящиеся, модернизируемые и действующие пункты производства и подготовки гранулированных и водосодержащих взрывчатых веществ промышленного назначения, размещаемые на поверхности и в подземных выработках рудников и шахт, не опасных по газу или пыли, а также на соответствующие вспомогательные стационарные производства, обеспечивающие нормальное функционирование смесительно-зарядных машин и передвижных растаривающих установок.

Внешние безопасные расстояния от зданий, в которых изготавливаются или перерабатываются взрывчатые вещества, должны определяться расчетом согласно требованиям Единых правил безопасности при взрывных работах по действию ударной воздушной волны как для складов взрывчатых материалов. При этом масса взрывчатого вещества принимается с учетом тротилового эквивалента.

Площадки для испытаний и (или) уничтожения сжиганием или взрыванием различных взрывопожароопасных отходов, сметок, брака производства и взрывчатых веществ, пришедших в негодность и не отвечающих требованиям нормативно-технической документации, должны выбираться с таким расчетом, чтобы была обеспечена полная безопасность для пунктов производства и подготовки взрывчатых веществ, а также для населенных пунктов, транспортных путей и инженерных сооружений района.

Площадки следует выбирать на закрытой местности (овраги, складки рельефа и т. п.), по возможности, на некаменистом грунте и располагать с подветренной стороны по отношению к жилым и промышленным объектам района (с учетом «розы» ветров). Территория площадок и местность

вокруг них на расстоянии 10 м должна очищаться от растительности и посторонних легковоспламеняющихся предметов. Площадка, расположенная за пределами ограждения пункта, должна иметь внешнюю предупредительную зону шириной 25 м с установлением на ней через каждые 100 м по длине предупредительных надписей.

Транспортные пути для перевозок взрывчатых материалов должны располагаться на расстояниях:

- не менее 15 м от зданий (помещений), в которых изготавливаются или перерабатываются взрывчатые вещества;

- не менее 3 м от зданий всех категорий, если пути предназначены для подъезда к этим зданиям;

- не менее 50 м от зданий, где имеются открытые огневые топки и источники открытого огня, или где производятся работы с открытым огнем (кузницы, котельные, сварочные мастерские и пр.), а также от хранилищ горючих и легковоспламеняющихся веществ;

- не менее 15 м от вспомогательных зданий, находящихся на территории пункта (столовые, конторы, бытовки и др.);

- не менее 6 м от всех прочих зданий, если строительные нормы и правила не требуют большего разрыва.

При организации производства и подготовки взрывчатых веществ должны предусматриваться комплексная механизация и автоматизация производственных процессов; устройства и механизмы управления, которые должны обеспечивать соблюдение заданной последовательности процессов, а также режимов работы оборудования; герметизация оборудования и аппаратуры, исключающая или максимально снижающая выделение вредных и опасных в отношении воспламенения и взрыва паров, газов и пыли; перемещение пылящих материалов пневмовакуумтранспортом или с применением других закрытых транспортных устройств; применение оборудования, имеющего встроенные местные отсосы с устройствами для улавливания вредных выделений из удаляемого в атмосферу воздуха; применение замкнутого водооборота; полное исключение или доведение до предельно допустимых концентраций токсичных продуктов в сбросах в водоемы; наличие контрольно-испытательной аппаратуры.

Пункты производства и подготовки взрывчатых веществ должны быть оборудованы общей телефонной связью, самостоятельной телефонной связью караулов с постами, пожарной сигнализацией. Обеспечение пожарной безопасности должно осуществляться в соответствии с действующими противопожарными нормами и действующими правилами пожарной безопасности.

Проектирование зданий и сооружений пунктов производства и подготовки взрывчатых веществ должно осуществляться с учетом требований санитарных норм, строительных норм и правил.

На каждом пункте производства или подготовки взрывчатых веществ должна быть разработана инструкция *по охране труда и технике безопасности*. Инструкция составляется в соответствии с требованиями действующих нормативов, настоящих Правил и регламента технологического процесса. Специальные инструкции по охране труда и технике безопасности должны быть разработаны также для обслуживающего персонала (слесарей, электромонтеров, слесарей контрольно-измерительных приборов). Работающие во вредных условиях должны быть обеспечены спецодеждой и индивидуальными средствами защиты.

На видных, хорошо освещенных местах производственной территории, зданиях, рабочих помещениях и оборудовании должны быть вывешены знаки и условные символы безопасности, предупредительные плакаты, соответствующие характеру выполняемых работ и предназначенные для привлечения внимания работающих и посетителей к возможной опасности, а также указывающие действия для ее предупреждения, схема движения пешеходов и транспорта по территории.

На воротах для въезда транспорта на территорию, в проходной для людей, входных дверях в производственные здания вывешивают знаки безопасности, запрещающие:

- въезд автотранспорта, не оборудованного искрогасительным устройством на выхлопной трубе двигателя;
- пронос легковоспламеняющихся жидкостей, курительных принадлежностей, использование открытого огня без особого на то разрешения.

В помещениях переработки взрывчатых компонентов и взрывчатых веществ должны быть вывешены знаки, запрещающие работать инструментом, дающим искру.

На рабочих местах вывешивают плакаты: «Пользоваться респиратором», «Работать с включенным воздухоотсосом».

Отличительная окраска оборудования и коммуникаций должна быть выполнена по соответствующему стандарту. Дороги и железнодорожные переезды должны быть оборудованы дорожными знаками.

Для предупреждения возможности возникновения опасных электростатических разрядов необходимо предусматривать следующие меры защиты:

- заземление электропроводящего оборудования и коммуникаций;
- применение нейтрализаторов;
- подбор пар контактирующих материалов, электризующихся зарядами разных знаков;
- увлажнение окружающей атмосферы;
- применение электропроводных материалов для оборудования;
- применение спецодежды.

Основными правилами безопасного *выполнения работ на производствах ВВ* являются:

- строгое соблюдение регламента технологического процесса и инструкций по охране труда;
- содержание в исправном состоянии оборудования, контрольно-измерительных приборов и технологических коммуникаций;
- поддержание в исправном состоянии вентиляционных систем, средств сигнализации (оповещения) и пожаротушения;
- использование кондиционного сырья и соблюдение норм загрузок взрывопожароопасной продукцией зданий и помещений;
- соблюдение всех предписываемых правил по охране труда и пожарной безопасности.

Все работающие с взрывчатыми материалами обязаны:

- хорошо знать их токсические и взрывопожароопасные свойства;
- работы производить в строгом соответствии с регламентом технологического процесса и настоящими Правилами.

Особую осторожность необходимо проявлять при чистке оборудования от остатков и пыли взрывчатых веществ, руководствуясь инструкциями, и применять только предусмотренные для этого способы и средства.

Перед чисткой вентиляционных трубопроводов и фильтров от пыли взрывчатых веществ необходимо применять орошение водой.

9.2. Обеспечение безопасности при проведении взрывных работ

Лица, назначенные для производства взрывов, должны знать правила обращения с взрывчатыми веществами и средствами взрывания, иметь навыки в выполнении этих задач и твердо знать меры предосторожности. Безопасными (для людей) при взрыве являются следующие расстояния:

- при взрыве зарядов до 10 кг без оболочек: в воздухе – 50 м, на грунте – 100 м;
- при подрывании дерева – 150 м;
- при подрывании кирпича, бетона, камня – 350 м;
- при подрывании открыто расположенных металлических конструкций – 500 м.

При взрывных работах требуется соблюдать следующие правила безопасности [16]: капсули-детонаторы зажигательных трубок и электродетонаторы вставляют в наружные заряды после их крепления на подрываемых элементах (объектах) непосредственно перед взрывом. При огневом способе взрывания к отказавшим зарядам может подходить только один человек и не раньше чем через 15 мин после отказа (когда по расчету должен был произойти взрыв). При обнаружении признаков горения шнура подходить к зарядам воспрещается. По команде «Приготовиться» подрывники становятся у зарядов и подготавливаются к воспламенению зажигательных трубок. Поджигание производят по команде «Огонь», отходят

подрывники по команде «Отходи». По этой команде должны отходить все подрывники, в том числе и не успевшие поджечь трубки.

При электрическом способе взрывания проверку электровзрывных сетей и подключение магистральных проводов к источнику тока должны производить только после удаления всех людей от мест расположения зарядов. В момент установки электродетонаторов в заряды в магистральных проводах электровзрывной сети на удалении 30–40 м от подрываемого заряда устраивают «разрыв безопасности» (разрывают один из магистральных проводов). Его сращивание при отходе осуществляет лицо, производящее установку электродетонаторов в заряды. При производстве групповых взрывов результаты взрыва должен проверять один человек. При отказе необходимо отключить концы магистральных проводов от источника тока, изолировать их, развести в стороны и выяснить причины отказа. Подходить к невзорвавшемуся (отказавшему) заряду разрешается не раньше чем через 15 мин.

При работах с *фейерверочными изделиями* необходимо соблюдать максимальную осторожность. Запрещается бросать изделия, ударять по ним какими-либо предметами, тянуть за провода электровоспламенителей или огнепроводный шнур, а также выдергивать их. Провода электровоспламенителей изделий до монтажных работ на пусковой площадке должны быть замкнуты накоротко.

Запрещается переносить изделия в карманах, под одеждой, хранить без укупорки, бросать, перекачивать (кантовать) и бросать ящики с изделиями; при всех работах с фейерверочными изделиями курить и производить какие-либо операции с открытым огнем, а также держать изделия вблизи открытых источников огня.

Разрешается пользоваться только инструментом из цветных металлов (латунь, медь, алюминий) или омедненными и латунированным инструментом.

К работе с фейерверочными изделиями допускают лиц, имеющих специальное удостоверение и прошедших периодическое обучение и инструктаж. На все виды работы должны быть составлены инструкции.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Демидов, П.Г. Горение и свойства горючих веществ / П.Г. Демидов, В.А. Шандыба, П.П. Щеглов. – 2-е изд., перераб. – М.: Химия, 1981. – 248 с.
2. Пожарная безопасность. Взрывобезопасность: справочное издание / А.Н. Баратов, Е.Н. Щеглов, А.Я. Корольченко и др. – М.: Химия, 1987. – 272 с.
3. ГОСТ 12.1.044-89.ССБТ. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов. Номенклатура показателей и методы их определения. – М.: Изд-во стандартов, 1990. – 143 с.
4. Голотин, Г.И. Теория горения и взрыва: конспект лекций / Г.И. Голотин; под ред. А.В. Хашковского. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 1999. – Ч. I. – 84 с.
5. Голотин, Г.И. Теория горения и взрыва: учебное пособие к практическим занятиям / Г.И. Голотин, И.В. Зубанова; под ред. А.И. Сидорова. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2000. – Ч. I. – 82 с.
6. Андреев, К.К. Теория взрывчатых веществ: учебник для химико-технологических специальностей вузов / К.К. Андреев, А.Ф. Беляев. – М.: Оборонгиз, 1960. – 560 с.
7. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов и средства их тушения: справочное издание/ А.И. Баратов, А.Я. Корольченко, Г.Н. Кравчук и др. – М.: Химия, 1990. – Кн. 1. – 496 с.
8. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов и средства их тушения: справочное издание/ А.И. Баратов, А.Я. Корольченко, Г.Н. Кравчук и др. – М.: Химия, 1990. – Кн. 2. – 384 с.
9. Взрывные явления. Оценка и последствия / У. Бейкер, Г. Кокс, П. Уэстайн и др. / пер. с англ.; под ред. Я.Б. Зельдовича, Б.Е. Гельфанда. – М.: Мир, 1986. – Кн.1. – 319 с.
10. Взрывные явления. Оценка и последствия / У. Бейкер, Г. Кокс, П. Уэстайн и др. / пер. с англ.; под ред. Я.Б. Зельдовича, Б.Е. Гельфанда. – М.: Мир, 1986. – Кн. 2. – 384 с.
11. Физика взрыва: монография / под ред. К.П. Станюковича. – 2-е изд., перераб. – М.: Наука, 1975. – 704 с.
12. Орленко, Л.П. Физика взрыва и удара: учебное пособие для вузов / Л.П. Орленко. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006. – 304 с.
13. Физика взрыва: учебник: в 2 т. / под ред. Л.П. Орленко. – Изд. 3-е, испр. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. – Т 1. – 832 с.
14. Физика взрыва: учебник: в 2 т. / под ред. Л.П. Орленко. – Изд. 3-е, испр. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. – Т 2. – 656 с.
15. Об утверждении Правил устройства и безопасной эксплуатации пунктов производства и механизированной подготовки к применению взрывчатых веществ в организациях, ведущих взрывные работы. Постановление Госгортехнадзора РФ от 17 июня 2003 г. № 93.
16. ПБ 13-407-01. Единые правила безопасности при взрывных работах. Утв. Постановлением Госгортехнадзора России от 30.01.2001 № 3.

ОГЛАВЛЕНИЕ

1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ГОРЕНИИ	
1.1. Введение	3
1.2. Основные понятия.....	4
1.3. Горение и условия его протекания.....	7
1.4. Понятие о кинетическом и диффузионном горении	16
1.5. Химические реакции горения.....	19
1.6. Горение в атмосферном воздухе	20
1.7. Классификация и характеристика пожароопасных веществ	22
1.8. Показатели пожаро- и взрывоопасности веществ и материалов.....	25
2. ОСОБЕННОСТИ ГОРЕНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ВЕЩЕСТВ И МАТЕРИАЛОВ	31
2.1. Горение газов	31
2.2. Горение жидкостей	36
2.3. Горение твердых веществ.....	38
2.3.1. Горение органических материалов.....	38
2.3.2. Горение неорганических твердых веществ.....	41
2.4. Горение пылевоздушных смесей	42
2.4.1. Классификация пыли горючих веществ по степени пожаро- и взрывоопасности	43
2.4.2. Свойства, определяющие пожаровзрывоопасность пылей	43
2.4.3. Взрывы пылевоздушных смесей.....	45
2.5. Термодинамика процессов горения	45
3. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ВЗРЫВЕ	52
3.1. Взрыв и его разновидности.....	52
3.2. Классификация взрывных явлений	59
3.3. Характеристика аварийных взрывов.....	60
4. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВАХ (ВВ).....	62
4.1. Основные понятия.....	62
4.2. Классификация взрывчатых веществ.....	67
4.3. Характеристика взрывчатых веществ	69
4.4. Химические реакции взрывных превращений	69
4.4.1. Расчет состава продуктов взрывчатого разложения ВВ с положительным кислородным балансом (I группа ВВ).....	71
4.4.2. Расчет состава продуктов взрывчатого разложения ВВ с отрицательным кислородным балансом (II группа ВВ)	72
4.4.3. Составление уравнений реакций взрывчатого разложения ВВ с отрицательным КБ (III группа).....	74
4.5. Объем продуктов взрывчатого разложения.....	75
4.6. Теплота и температура взрыва	77
4.6.1. Теплота взрыва	77
4.6.2. Температура продуктов взрыва	82

4.7. Давление продуктов взрыва.....	85
4.7.1. Расчет величины давления продуктов взрыва	86
5. УДАРНЫЕ ВОЛНЫ.....	90
5.1. Общие сведения о воздушной ударной волне	90
5.2. Параметры воздушной ударной волны (ВУВ)	97
5.3. Отражение ВУВ от прочных преград	103
5.4. Условия на фронте ударной волны	105
5.5. Регулярное и маховское отражение волн.....	107
5.6. Плоская прямая ударная волна.....	110
5.7. Явление детонации. Гидродинамическая теория детонации. Детонационная волна	111
5.8. Вычисление параметров детонационных волн в газовых и конденсированных системах	116
6. ДЕЙСТВИЕ ВЗРЫВА	119
6.1. Основные факторы разрушающего действия УВ и элементы закона подобия при взрыве.....	119
6.2. Действие взрыва на здания, сооружения и оборудование. Виды разрушения	121
6.3. Зоны действия взрыва.....	122
6.4. Действие взрыва на организм человека	122
6.5. Кумулятивный эффект и его использование	125
7. ОСОБЕННОСТИ ВЗРЫВА В ГРУНТЕ И ВОДЕ	
7.1. Характерные особенности грунтов	134
7.2. Зоны действия и разрушающее действие взрыва в грунте	134
7.3. Ударные волны в воде.....	137
7.4. Экспериментальные исследования в области взрывов	138
8. ТЕОРИИ ВЗРЫВА	
8.1. Теория теплового взрыва.....	140
8.2. Теория зажигания	143
8.3. Физические и химические взрывы.....	146
8.4. Кавитация	152
8.5. Искровой разряд.....	155
9. МЕРЫ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ОБРАЩЕНИИ СО ВЗРЫВЧАТЫМИ ВЕЩЕСТВАМИ	
9.1. Меры безопасности при хранении, транспортировке и производстве взрывчатых веществ.....	157
9.2. Обеспечение безопасности при проведении взрывных работ	162
Библиографический список	164