

## ВВЕДЕНИЕ

Целью монографии является рассмотрение условий обеспечения взрывобезопасности зданий, сооружений, транспортных средств и защиты людей от взрывных воздействий. Изложение материала ведётся по принципу от общего к частному.

В разделе 1 приводятся термины и определения. Затем даётся общая характеристика различных типов аварийных взрывов без расчётных зависимостей, только описание.

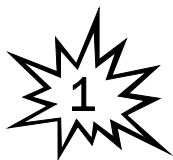
В разделе 2 представлены расчётные зависимости для определения параметров воздушной ударной волны (ВУВ) при взрывах сосудов, работающих под давлением. В этом разделе впервые даются формулы для определения импульсов воздействия и длительности действия положительной фазы ВУВ.

Расчёты избыточного давления разбиты на две части: первая — по прилагаемым графикам экспериментальных данных вблизи от сосуда, вторая — по формулам для дальних расстояний. Даются указания по определению входящих в формулы коэффициентов, сопряжённых с конечным результатом, определённым по графикам. В заключение раздела приводится пример расчёта параметров ВУВ, возникающих при разрушении сосуда, работающего под давлением.

Раздел 3 посвящён определению параметров детонационной волны и ВУВ, генерируемой расширением продуктов детонации. Здесь даются эмпирические формулы для определения импульса и длительности действия ВУВ и зависимости для определения остальных параметров ВУВ. В конце раздела приводится пример определения параметров ВУВ.

В этом разделе приведены таблицы физико-химических свойств газо- и паровоздушных смесей (ГПВС) и расчётных данных по параметрам ВУВ на различных расстояниях.

В разделах 4 и 5 приводятся методы расчета параметров волны сжатия (ВС) при наземных аварийных дефлаграционных взрывах. Этот раздел наиболее сложный в связи с самим характером дефлаграционных взрывов. Приводится волновая диаграмма дефлаграционного взрыва для лучшего понимания распространения пламени взрыва и генерируемой им волны сжатия, даются рекомендации по определению нагрузок при взаимодействии ВС с сооружениями, сходными по форме с параллелепипедом и вертикальным круговым цилиндром.



## ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ О ВНЕШНИХ АВАРИЙНЫХ ВЗРЫВАХ

### 1.1. Термины и определения\*

*Взрывная авария* — авария, причиной которой является взрыв.

*Сценарий взрывной аварии* — предполагаемая последовательность развития событий и явлений, приводящая к взрывной аварии. Разработка профессионально обоснованного сценария взрывной аварии есть условие эффективных мер по снижению ущерба от взрывной аварии.

*Консервативный подход* — подход при разработке сценария взрывной аварии, при котором для параметров и характеристик принимаются значения и пределы, заведомо приводящие к более неблагоприятным результатам. Консервативный подход обязателен при объективном недостатке научных знаний о закономерностях рассматриваемых явлений, о свойствах веществ, о значимости влияющих факторов.

*Взрыв* — быстропротекающее физико-химическое явление, связанное с быстрым освобождением потенциальной энергии и переходом ее в энергию движущихся сжатых газов, которые создают волну сжатия или одну из его форм — ударную волну. Наиболее распространены следующие типы взрывов: химические взрывы в виде детонационных и дефлаграционных взрывов, физические взрывы в виде взрывов сосудов, работающих под давлением (СРПД), взрывы масс льда на полярных реках, электродинамические взрывы.

*Конденсированные взрывчатые вещества (ВВ)* — твердые, пластичные, жидкие ВВ, способные взрываться без химического соединения с кислородом воздуха, например под водой.

*Горючая смесь* — смесь горючего газа (газов) с воздухом (кислородом). Типы горючих смесей: газоздушная смесь (ГВС), газопаровоздушная взрывоопасная смесь (ГПВС). Горючая смесь называется бедной, если горючей компоненты в ней меньше, чем может быть окислено имеющимся воздухом, и наоборот, называется богатой — при обратном соотношении

---

\* Последовательность приведения терминов и определений диктуется принципом рассмотрения материала от общего к частному.

горючего вещества и воздуха. Газовая смесь (ГС) называется стехиометрической при точном соответствии горючего и воздуха.

*Взрывчатая смесь* — горючая смесь, образовавшаяся до момента воспламенения и способная к взрывному горению.

*Горение* — экзотермическая реакция соединения горючего газа (горючей компоненты) с кислородом воздуха параллельно с образованием горючей смеси. Скорость горения, так называемая нормальная скорость горения, индивидуальна для каждого вида горючей смеси. Скорость распространения пламени горения (видимая скорость пламени) в значительной степени зависит от скорости образования горючей смеси.

*Взрывное горение* — распространение пламени в заранее образовавшейся (подготовленной) горючей смеси. Скорость распространения пламени зависит от вида взрывного горения: детонационного либо дефлаграционного.

*Детонационное взрывное горение (детонационный взрыв)* — характеризуется сверхзвуковой скоростью распространения пламени (1600...3000 м/с) и совместным движением ударной волны и химической зоны горения во взрывчатой смеси; создает высокие избыточные давления (1400...2000 кПа) и скоростной напор.

Каждому виду взрывчатой смеси соответствует своя постоянная скорость распространения детонационного пламени.

*Дефлаграционный взрыв* — характеризуется дозвуковой скоростью распространения пламени. Фронт пламени является проницаемым поршнем, создающим при своем движении впереди себя волну сжатия, избыточное давление в которой увеличивается от фронта волны к фронту пламени. Фронт волны сжатия распространяется со скоростью звука. Скорость распространения фронта пламени дефлаграционного взрыва зависит от большого числа факторов (нормальной скорости горения, интенсивности инициирования горения, турбулизации горючей смеси перед фронтом пламени, массы горючей смеси, формы облака горючей смеси, распределения концентрации горючей компоненты в смеси, от места воспламенения облака). Как правило, скорость пламени дефлаграционного взрыва меняется во времени, может иметь несколько локальных максимумов. Максимальные значения избыточного давления и скоростного напора достигаются перед фронтом пламени.

Анализ взрывных аварий показывает, что около 90 % всех аварийных взрывов в промышленности являются дефлаграционными взрывами.

*Огненный шар (ОШ) химического взрыва.* В процессе распространения фронта пламени в среде, состоящей из взрывчатой смеси, за ним возникает светящаяся сфера (полусфера), состоящая из раскаленных продуктов взрыва (ПВ). При детонационном взрыве границы огненного шара расширяются со скоростью детонационной волны до достижения радиуса свежей ГС, в последующем радиус ОШ увеличивается со снижающейся скоростью и достигает в 1,8...2 раза большего значения, чем радиус свежей смеси.

При дефлаграционном взрыве ОШ расширяется с переменной скоростью и достигает значения двойного радиуса свежей ГС. Образование ОШ сопровождается интенсивным тепловым излучением и распространением волны сжатия высокой интенсивности.

*Огневой шар (ОГШ) физического взрыва.* Возникает вследствие разбрасывания капель горючего вещества при разрушении емкостей с горючими веществами, при нагревании пожаром. Горючая смесь создается в процессе горения на поверхности капель. Скорость пламени зависит от скорости образования горючей смеси и, как правило, имеет невысокие значения (около 7...8 м/с). Образование огневого шара сопровождается невысоким давлением (до 1,5...2 кПа) в волне сжатия, тепловое излучение его значительно слабее, чем при образовании огненного шара. В иностранной литературе образование огневого шара получило наименование «явление BLEVE».

*Перегретая горючая жидкость* — горючая жидкость, хранящаяся под давлением при температуре более высокой, чем температура кипения при нормальном атмосферном давлении.

*Криогенная горючая жидкость.* Образуется в результате сильного охлаждения горючих газов и перевода их в жидкое состояние. С целью предупреждения вскипания криогенная горючая жидкость хранится при пониженной температуре в замкнутых сосудах.

*Объемная концентрация* — отношение объема горючего газа (пара) к объему всей ГПВС в условиях международной стандартной атмосферы (МСА), выражаемая обычно в так называемых объемных процентах и обозначаемая % об.

*Массовая концентрация* — масса горючего газа (пара), содержащаяся в 1 м<sup>3</sup> ГПВС, измеряемая обычно в г/м<sup>3</sup>, обозначается  $C_m$ .

*Стехиометрическая концентрация* — определенное содержание горючей компоненты в ГПВС, строго соответствующее содержанию воздуха в ГПВС, необходимого для обеспечения полного сгорания этой смеси. Стехиометрическая концентрация может выражаться как в объемных процентах, так и в г/м<sup>3</sup>.

*Нижний концентрационный предел воспламенения (НКПВ)* — минимальное содержание горючего газа (пара) в ГПВС, необходимое для воспламенения и устойчивого взрывного горения. Выражается либо в % об, либо в г/м<sup>3</sup>.

*Верхний концентрационный предел воспламенения (ВКПВ)* — максимальное содержание горючего газа (пара) в ГПВС, при котором возможно воспламенение и устойчивое горение ГПВС.

*Нижний концентрационный предел детонации (НКПД)* — минимальное содержание горючего газа (пара) в ГПВС, необходимое для начала и устойчивого поддержания детонационного процесса.

*Верхний концентрационный предел детонации (ВКПД)* — максимальное содержание горючего газа (пара) в ГПВС, при котором может начаться и устойчиво продолжаться детонационный процесс.

*Взрывоопасная концентрация горючего газа* — такая концентрация горючего газа в ГС, которая находится в пределах от НКПВ до ВКПВ.

*Облако ГПВС* — объем, состоящий из ГПВС, принимающий в зависимости от соотношения плотности ГПВС и атмосферного воздуха, скорости ветра и скорости образования различные формы: полусферические, вытянутые, блиновидные, а по отношению к земной поверхности — восходящие и стелющиеся. Наиболее опасны стелющиеся облака ГПВС.

*Дрейф облака ГПВС* — перемещение облака ГПВС по ветру и рассеивание по пути движения. Дрейф облака сопровождается постоянным изменением концентрации горючей смеси. Дальность дрейфа измеряется от места образования облака ГПВС до места, на котором сохраняются взрывоопасные концентрации горючей смеси. Основные факторы, определяющие дальность дрейфа: масса горючего вещества в облаке, состояние атмосферы и свойства ГПВС. Дрейфовать могут только облака, имеющие большую, чем плотность атмосферы, плотность.

*Взрывная волна* — перемещающиеся от центра взрыва (ЦВ) чередующиеся области повышенного давления воздуха (или другой среды распространения) и пониженного давления (относительно атмосферного давления), а также увлекаемые взрывной волной частицы воздуха (среды), которые создают скоростной напор.

*Воздушная ударная волна (ВУВ)* — взрывная волна, давление и скоростной напор в которой возрастают на ее фронте скачкообразно, достигая там максимальных значений. На (во) фронте ВУВ происходящие газодинамические процессы подчинены адиабате Гюгонио, а за фронтом ударной волны — адиабате Пуассона. Область повышенного давления в ВУВ называется положительной фазой или фазой сжатия, а область пониженного давления — отрицательной фазой или фазой разрежения. При взрывах больших количеств ГПВС могут образоваться две или более как положительных, так и отрицательных фазы. В расчетной практике важны 1-я положительная и 1-я отрицательная фазы.

*Слабая ВУВ* — в монографии принято условно, что слабая ВУВ имеет максимальное избыточное давление не более 30 кПа.

*Волна сжатия* — взрывная волна, не имеющая ударного фронта; характерна постепенным повышением значений избыточного давления и скоростного напора до максимума. Как правило, образуется при дефлаграционных взрывах ГПВС.

*Волна разрежения* — волна снижения избыточного давления и скоростного напора. Для волны разрежения характерно, что скорость частиц направлена в ней противоположно направлению распространения волны разрежения. В области, охваченной волной разрежения, могут быть как избыточные давления, так и давления ниже атмосферного давления.

*Внутренний взрыв* — взрыв, происходящий в помещении.

*Внешний взрыв* — взрыв, происходящий вне помещений в атмосфере.

## 1.2. Общая характеристика внешних аварийных взрывов

В природе и в жизни индустриального общества происходит много взрывов различной природы. Эти взрывы делятся на физические и химические.

*Физические взрывы* — это те, при которых не происходят химические превращения. К ним относятся взрывы баллонов, наполненных сжатыми газами, взрывы паровых котлов, взрывы льда на северных реках при сильных морозах.

Общим для этих взрывов является переход накопленной потенциальной энергии в кинетическую с образованием ВУВ, часто вызывающую большие разрушения строительных конструкций и поражения людей.

*Химические взрывы* — это те, при которых накопленная потенциальная химическая энергия при воздействии внешнего инициатора (капсюля-детонатора, сильного нагрева, электростатического электричества, сильного механического удара, прострела пульей и т.п.) переходит в кинетическую с образованием ВУВ или ВС. К химическим взрывам относятся взрывы:

- газопаровоздушных взрывоопасных смесей, например, пропановоздушных, ацетиленовоздушных, метановоздушных, ацетиленокислородных, водородо-кислородных и т.п.;
- различных взрывчатых веществ, тротила, аммотола, пластита, мелинита и т.п., содержащих в своём составе окислитель и потому способных взрываться под водой.

Горючие газы и жидкости могут взрываться только при смешении с окислителем, например, с воздухом, в котором содержится 21 % кислорода, или с чистым кислородом или с другим окислителем, например с фтором.

Сделаем обобщающий вывод: взрыв — это быстрое превращение потенциальной энергии вещества в кинетическую с образованием ВУВ или ВС.

Кроме ППВС и ВВ могут взрываться различного рода мелкодробленые в порошок вещества и материалы, казалось бы совершенно несовместимые с понятием взрыв. Это порошки железа, алюминия, титана и др. Это также мука, текстильная и древесная пыль. Такие порошки и пыль, поднятые в воздух, при наличии воспламенителя могут взрываться с большой энергией. От этих взрывов страдают предприятия порошковой металлургии, элеваторы, текстильные предприятия, предприятия мебельной и деревообрабатывающей промышленности.

Помимо указанных выше взрывов происходят также *многостадийные взрывы*. Так, при взрывах баллонов со сжатыми горючими газами сначала (обычно при пожарах) происходит физический взрыв: при нагревании давление в баллоне резко возрастает и баллон разрушается, освободившийся горючий газ перемешивается с воздухом и образуется взрывоопасная смесь, которая взрывается. Такие взрывы характерны для стройплощадок, где часто хранится большое количество баллонов с ацетиленом и пропаном для газосварочных работ.

Аварийные взрывы делятся на *внешние*, происходящие в атмосфере и воздействующие на сооружения, транспорт и людей извне, и *внутренние*, происходящие в помещениях, а также *переходные взрывы*, когда *внешний взрыв возникает в атмосфере вследствие взрыва ГС, выброшенного из помещения внутренним взрывом*. При внутренних взрывах до 80...85 % негоревшей смеси выбрасывается из помещения: это смесь, взрываясь, производит большие разрушения остекления зданий.

Данная монография посвящена внешним взрывам.

При взрывах ВВ и сосудов, работающих под давлением, а также при детонационных взрывах ГПВС возникают воздушные ударные волны, а при дефлаграционных взрывах — чаще всего *волны сжатия*.

При детонационном взрыве вначале в облаке ГПВС распространяется детонационная волна с постоянной для данной смеси сверхзвуковой скоростью (1600...2200 м/с) в пределах облака смеси, которое до окончания детонации не успевает расшириться. Затем происходит расширение ПВ, которое сопровождается распространением ВУВ. Облако ПВ расширяется примерно в восемь раз, а радиус облака увеличивается примерно в два раза. Раскалённое облако ПВ извне воспринимается как ОШ. Температура ОШ составляет около 2000...3000 °С, а максимальное давление в нём — около 2500...3500 кПа.

При дефлаграционном взрыве пламя взрыва распространяется с дозвуковой (до 300 м/с), меняющейся во времени скоростью, и сопровождается образованием ОШ. Как правило, при дефлаграционном взрыве возникает волна сжатия, на фронте которой избыточное давление практически равно нулю, а на границе с фронтом пламени имеет максимальное значение. Таким образом, в волне сжатия давление падает от фронта пламени к фронту волны. На рис. 1.1 показаны профили сферической, плоской ударной волны и волны сжатия.

Ударные волны бывают *сферическими (полусферическими)* при взрыве в атмосфере, в них давление сразу резко падает за фронтом волны; также бывают *плоские* волны при взрывах в протяженных тоннелях, в протяжённых подземных переходах и канализационных тоннелях. В плоских волнах давление и другие параметры за фронтом волны значительное время остаются такими же, как и на фронте волны. Как видно на рис. 1.1, а, б, избыточное давление  $\Delta p$  (над атмосферным давлением) сразу за фронтом сферической волны начинает спадать. Это связано с тем, что давление в волне пропорционально плотности энергии в волне. При распространении ВУВ по радиусу от центра взрыва увеличивается объём воздуха, охваченной волной. Вследствие этого падает плотность энергии в волне и соответственно давление в волне.

В плоской ВУВ (см. рис. 1.1, в), распространяющейся в каналах (трубах, тоннелях), плотность энергии остаётся постоянной пока действует давление, создающее плоскую волну (например, от движения поршня или продуктов взрыва).

В ударной волне и волне сжатия избыточное давление и движение воздуха, увлекаемое волной, знакопеременны: имеется положительная фаза (фаза

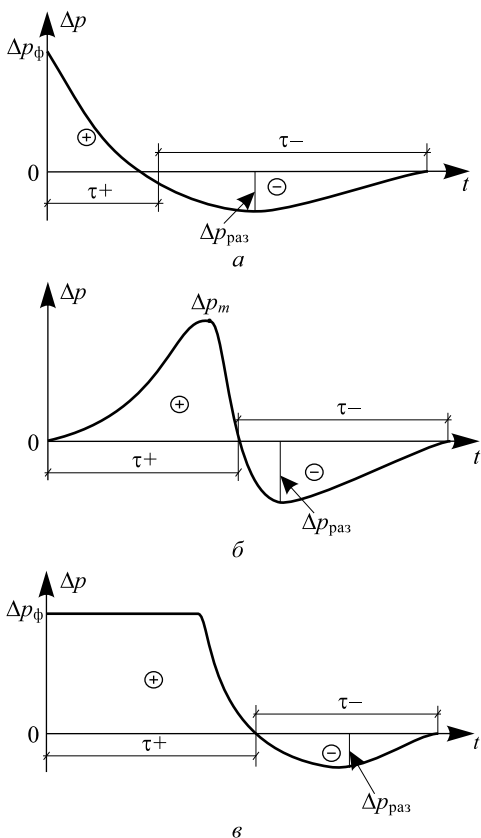


Рис. 1.1. Профили избыточного давления:

*a* — в ударной волне; *б* — в волне сжатия; *в* — в плоской волне;  $\Delta p_{\phi}$  — избыточное давление на фронте волны, кПа;  $\tau_{+}$  — длительность положительной фазы, мс;  $\tau_{-}$  — длительность отрицательной фазы, мс;  $\Delta p_{\text{раз}}$  — давление разрежения в отрицательной фазе, кПа;  $\Delta p_m$  — максимальное давление во второй зоне дефлаграционного взрыва, кПа

сжатия) и отрицательная фаза (фаза разрежения). В сильных ударных волнах (например, образующихся при ядерных взрывах), могут возникать несколько чередующихся фаз сжатия и разрежения. Это связано с колебаниями атмосферного воздуха, вызываемыми распространением ударной волны.

Движение воздуха в ВУВ и ВС создаёт скоростной напор, направление действия которого в положительной фазе — от центра взрыва, а в отрицательной фазе — к центру взрыва.

Кроме описанных взрывов есть ещё одно явление, занимающее промежуточное положение между взрывом и пожаром. Это образование (не путать с огненными шарами) *огневых шаров* (ОГШ), возникающих после фи-



зических взрывов ёмкостей со сжиженными газами (обычно нефтяными) и с горючими жидкостями (бензин, керосин). Часто они возникают при падении самолётов с авиакеросином в баках, расположенных в крыльях. При разбрызгивании в каплевидное состояние и воспламенении во всём объёме облака капли начинают испаряться со своей поверхности, образовывать взрывоопасную смесь и воспламеняться. Поскольку это многостадийный процесс, расширение горящего облака происходит со скоростью всего около 7...8 м/с. Давление, создаваемое расширяющимся облаком — огненным шаром, очень малое, всего максимально около 1,5...2 кПа. Однако тепловое излучение такого облака очень интенсивное, способное вызвать пожары.

Чрезвычайно опасны взрывы сосудов, наполненных сжиженными горючими газами, например, сжиженным пропаном, пропиленом, этиленом, бутаном и т.д. Такие криогенные жидкости обладают повышенным запасом потенциальной энергии: физической (за счёт глубокого охлаждения) и химической. Криогенные жидкости при вскипании и превращении в пар за счёт теплоты окружающей среды расширяются в сотни раз, например, сжиженный воздух в 760 раз.

В момент разрушения сосуда возникает слабая ударная волна, воспринимаемая как хлопок, а после воспламенения — огневой шар (в случае компактного распределения пара) и множественные очаги сгорающего пара (в случае пространственного распределения выброшенного пара).



## РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ВОЗДУШНО-УДАРНОЙ ВОЛНЫ ПРИ ВЗРЫВАХ СОСУДОВ, РАБОТАЮЩИХ ПОД ДАВЛЕНИЕМ

### 2.1. Определение параметров воздушной ударной волны

К взрывам, происходящим в результате воздействия ВУВ, относятся взрывы паровых котлов, резервуаров с горюче-смазочными материалами (ГСМ) и криогенными жидкостями, ресиверов, баллонов со сжатыми газами, газопроводов, паровых аккумуляторов тепла и т.п. Наиболее частой причиной таких взрывов является разогрев сосудов возникшим пожаром, разогрев хранящихся в них горючих жидкостей, повышение давления в результате парообразования и, наконец, их разрушение. В результате распада газодинамического разрыва между значениями давления внутри сосуда и в атмосфере возникает ударная волна.

Максимальное давление  $\Delta p_c$ , которое может развиваться при пожаре внутри емкости к моменту разрыва, определяется прочностью стенок сосуда и может быть вычислено для тонкостенных сферических и цилиндрических сосудов по безмоментной теории по формуле

$$\Delta p_c = \frac{2 \cdot \sigma \cdot \delta}{3r}, \text{ кПа,}$$

где  $\sigma$  — временное сопротивление разрыву стали при нормальной температуре, кПа;

$\delta$  — толщина стенок, м;

$r$  — радиус сосуда, м.

Максимальное давление, которое может развиваться в момент разрушения сосуда, можно определить, исходя из следующей формулы:

$$p_c = p_n \cdot 1,5, \text{ кПа,}$$

где  $p_n$  — эксплуатационное значение давления в сосуде при эксплуатации в нормальных условиях; определяется по данным справочника по технике безопасности [1].

Плотность газа в момент разрушения сосуда остается равной начальной плотности, температура в баллоне определяется по формуле Шарля

$$T_c = T_n \cdot \frac{p_c}{p_n}, \text{ К,}$$

где  $T_c$  — температура в сосуде, К;

$T_n$  — начальная температура до разогрева, К;

$p_c$  — полное давление в сосуде в момент разрушения, кПа;

$p_n$  — начальное давление до разрушения, кПа.

Скорость звука в газе, заполняющем сосуд в момент разрушения, определяется по формуле

$$\alpha_c = \sqrt{k_c \cdot R_{уд} \cdot T_c}, \text{ м/с,}$$

где  $k_c$  — показатель адиабаты в газе, определяемый по справочникам термодинамических свойств газов [2];

$R_{уд}$  — удельная газовая постоянная газа, Дж/(кг·К), определяемая по формуле

$$R_{уд} = \frac{8314,35}{\mu}, \text{ Дж/(кг·К),}$$

здесь  $\mu$  — молекулярная масса вещества;  $R_{уд}$  также обозначается  $R$  с нижним индексом, соответствующим виду горючего, например  $R_k$  — для кислорода и т.д.

Начальные параметры ВУВ определяются по зависимости

$$\frac{p_c}{p_a} = \frac{2k_a M_1^2 - (k_a - 1)}{k_a + 1} \cdot \left[ 1 - \frac{k_c - 1}{k_a + 1} \cdot \frac{\alpha_a}{a_c} \cdot \left( M_1 - \frac{1}{M_1} \right) \right]^{\frac{2 \cdot k_c}{k_c - 1}}, \quad (2.1)$$

где  $p_a$  — атмосферное давление, кПа;

$p_c$  — полное давление в сосуде, кПа;

$M_1 = D/\alpha_a$  — отношение скорости фронта ВУВ  $D$  к скорости звука  $\alpha_a$  при той температуре, которая есть в невозмущенной атмосфере в момент взрыва;

$k_a$  — показатель адиабаты\* в атмосфере, определяемый по справочнику [2];

$k_c$  — показатель адиабаты для газа в сосуде, определяемый по справочнику [2];

---

\* Показатель адиабаты — это отношение теплоёмкости газа при постоянном давлении  $C_p$ , Дж/(кг·К), к теплоёмкости при постоянном объёме  $C_v$ , т.е.  $k = C_p / C_v$ .

Уравнение (2.1) решается относительно  $M_1$  методом итераций либо графоаналитически, как показано на рис. 2.1. Избыточное начальное давление на границе сосуда  $\Delta p_n$  определяется из выражения

$$\Delta p_n = p_a \cdot \frac{2k_a}{k_a + 1} \cdot (M_1^2 - 1), \text{ кПа.} \quad (2.2)$$

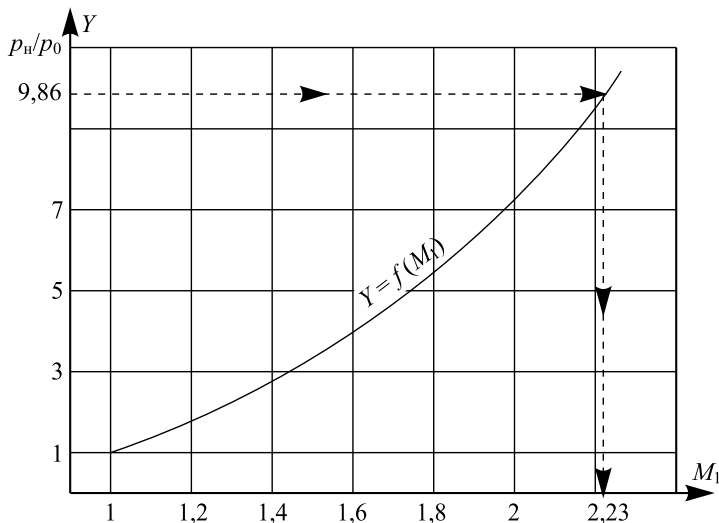


Рис. 2.1. Графоаналитический метод определения значения  $M_1$  в формуле (2.1)

При работе с графиком на рис. 2.2 формулу (1.7) записывают в виде

$$\frac{\Delta p_n}{p_a} = \frac{2k_a}{k_a + 1} \cdot (M_1^2 - 1), \quad (2.3)$$

где  $\Delta p_n/p_0$  является одной из координат для определения начальной точки А на рис. 2.2. Число  $M_1$  относится только к границе сосуда, оно равно  $M_\Phi$ . На других расстояниях используется произведение  $M_\Phi \cdot M_1$ , где  $M_\Phi$  — число Маха.

Вдали от взорвавшегося сосуда на расстоянии  $R$  от центра сосуда избыточные давления определяют в следующем порядке:

1. Приводят к полусферической форме объем сосуда  $V_c$  и определяют радиус полусферы по формуле

$$R_{\text{псф}} = 0,782 \cdot \sqrt[3]{V_c}, \text{ м.}$$

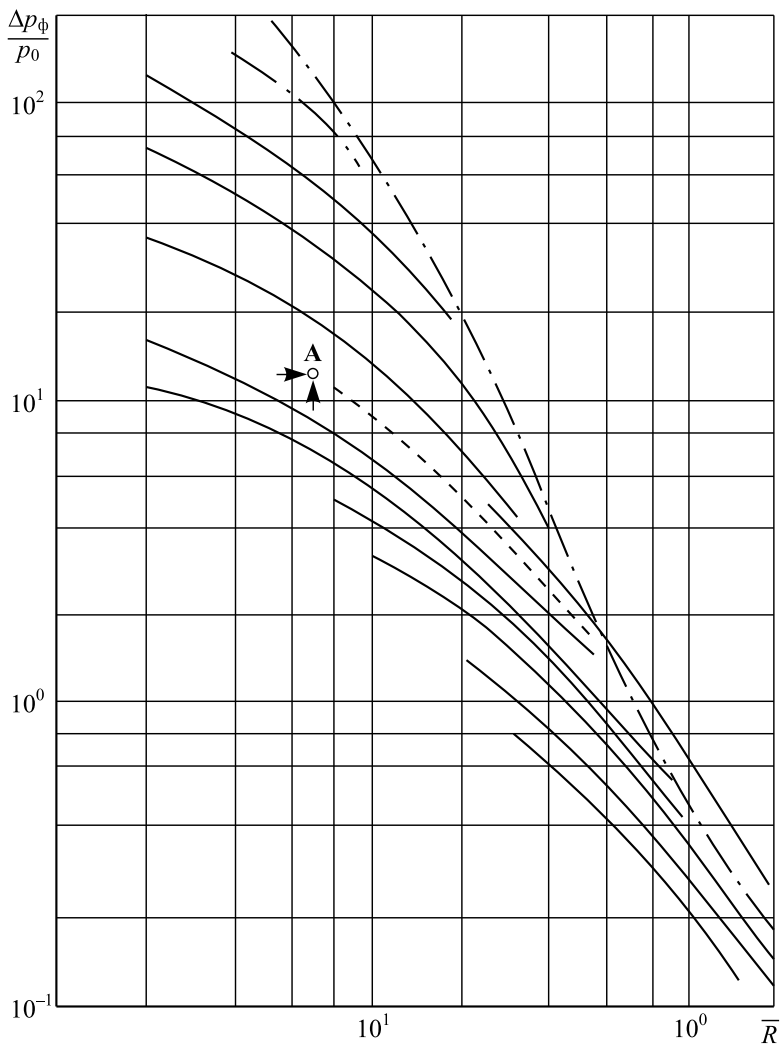


Рис. 2.2. График определения функции  $\frac{\Delta p_\phi}{p_0} = F(\bar{R})$ :

- спад давления в ВУВ при разрыве сосудов;
- . — спад давления в ВУВ при взрыве ВВ;
- А — ключ для построения начальной точки кривой, которая проводится пунктирной линией «параллельно» соседним кривым

2. Определяют значения исходных данных для расчета параметров ВУВ:

- объем сосуда (ресивера)  $V_c, \text{ м}^3$ ;
- полное давление в сосуде  $p_c, \text{ Па}$ ;
- потенциальную энергию сжатого газа

$$E_{\text{п}} = \frac{p_c \cdot V_c}{(k_r - 1)}, \text{ кДж},$$

где  $k_r$  — показатель адиабаты; принимают равным температуре газа в баллоне;

- энергию, переходящую в ВУВ:

$$E_{\text{ВУВ}} = E_{\text{п}}, \text{ кДж};$$

- корень кубический из энергии ВУВ при наземном взрыве:

$$Q = \sqrt[3]{2 \cdot E_{\text{ВУВ}}}, \text{ кДж}^{1/3}; \quad (2.4)$$

- приведенное расстояние по энергии

$$R^0 = \frac{R}{Q}, \text{ м/кДж}^{1/3},$$

где  $R$  — расстояние от центра сосуда до различных точек местности;

- избыточное давление при заданном приведенном расстоянии  $R^0 < 1,4 \text{ м/кДж}^{1/3}$  по графику на рис. 2.2:

– находят координаты точки А. Одну из координат определяют по формуле (2.2). Другая координата — это приведенное расстояние точки А на границе сосуда; определяется по формуле

$$R_A^0 = \frac{R_{\text{исф}}}{\sqrt[3]{2 \cdot E_{\text{ув}}}}, \text{ м/кДж}^{1/3};$$

– от точки А проводят кривую, «параллельную» соседним кривым. Давления на других приведенных расстояниях  $R^0$ , меньших  $1,4 \text{ м/кДж}^{1/3}$ , определяют, используя построенную кривую (см. рис. 2.2);

– давления на расстояниях, больших  $1,4 \text{ м/кДж}^{1/3}$ , определяют по формуле, коэффициенты в которой подбирают в зависимости от величины давления; эта формула будет получена на конечном этапе работы с графиком на рис. 2.2. Каждой кривой рис. 2.2, на расстояниях  $R^0 > 1,4 \text{ м/кДж}^{1/3}$ , соответствует своя формула. Общим для всех подбираемых формул является постоянство отношений коэффициентов, первого коэффициента ко второму и второго к третьему  $K_1/K_2 = 5,082$  и  $K_2/K_3 = 6,671$ ;

– подбирают коэффициенты методом последовательных приближений (обычно не более двух раз):

- значение 1-го коэффициента находят по зависимости

$$K_1 = R_n^0 \cdot \Delta p_\Phi,$$

где  $R_n^0$  и  $\Delta p_\Phi^H$  — принимают по конечному результату при расчете по графику  $\Delta p_\Phi/p_0 = F(R^0)$ ;

- значение 2-го коэффициента принимают равным

$$K_2 = \frac{K_1}{5,082};$$

- значение 3-го коэффициента определяют по формуле

$$K_3 = \frac{K_2}{6,671};$$

- вычисляют по полученной формуле значение давления при 2-м приближении  $\Delta p_\Phi^{(2)}$ , при начальном значении  $R_n^0$ ;

- определяют отношение

$$L = \frac{\Delta p_\Phi^{(2)}}{\Delta p_\Phi^H};$$

- все полученные ранее коэффициенты  $K_1$ ,  $K_2$  и  $K_3$  делят при 2-м приближении на  $L$  и вновь вычисляют значение  $\Delta p_\Phi^{(2)}$  с новыми коэффициентами. Как правило, значение  $\Delta p_\Phi^{(2)}$  оказывается близким к значению  $\Delta p_\Phi^H$ , и тогда останавливаются на формуле с последними значениями  $K_1$ ,  $K_2$  и  $K_3$ . Если значения  $\Delta p_\Phi^H$  и  $\Delta p_\Phi^{(2)}$  расходятся более чем на  $L$ , %, прибегают к 3-му приближению по приведенной ранее процедуре. В приводимом примере расчета эта формула имеет вид

$$\Delta p_\Phi = \frac{1}{R_n^0} \left[ 17,13 + \frac{1}{R_n^0} \left( 3,37 + \frac{1}{R_n^0} 0,51 \right) \right], \text{ кПа}, \quad (2.5)$$

где  $R_n^0$  — приведенное расстояние;  $R_n^0$  может изменяться от  $R^0 > 1,4$  м/кДж<sup>1/3</sup> и далее до расстояния, где давление  $\Delta p_\Phi$  станет равным примерно 5 кПа. Значения давлений, получаемые по графику и формуле (2.5), в сопрягаемой точке (сопрягаемом приведенном расстоянии) должны быть одинаковыми;

- находят число Маха на фронте ВУВ:

$$M_{\phi} = \sqrt{1 + \frac{k_a + 1}{2k_a} \frac{\Delta p_{\phi}}{p_0}};$$

отсюда

- скорость фронта ВУВ

$$D_{\phi} = \alpha_a \cdot M_{\phi}, \text{ м/с};$$

где  $\alpha_a$  — скорость звука в атмосфере;

- скорость потока воздуха на фронте ВУВ

$$U_{\phi} = 2,4 \frac{\Delta p_{\phi}}{M_{\phi}}, \text{ м/с};$$

- скоростной напор на фронте ВУВ

$$Q = \frac{2,5 \cdot \Delta p_{\phi}^2}{(\Delta p_{\phi} + 709)}, \text{ кПа};$$

- приведенный удельный импульс в ВУВ

$$I_{\text{уд}}^0 = \frac{0,694}{R^0}, \text{ Па} \cdot \text{с/кДж}^{1/3};$$

- удельный импульс в положительной фазе ВУВ

$$I_{\text{уд}} = I_{\text{уд}}^0 \cdot Q, \text{ Па} \cdot \text{с},$$

где значение  $Q$  определяют по формуле (2.4);

- показатель спада давления

$$n = 1 + \left( \frac{\Delta p_{\phi}}{p_0} \right)^{0,4};$$

- длительность положительной фазы ВУВ

$$\tau_{+} = \frac{I_{\text{уд}}(n+1)}{\Delta p_{\phi}}, \text{ с};$$

- закон изменения давления в положительной фазе ВУВ

$$\Delta p(t) = \Delta p_{\phi} \left( 1 - \frac{t}{\tau_{+}} \right)^n, \text{ кПа}.$$



Если жидкость в сосуде заполняет его не полностью, в расчетах учитывается только та часть объема, которая занята газом.

При развитии высоких давлений в сосуде до взрыва ВУВ, возникшая после взрыва, может быть очень интенсивной и вызывать большие разрушения. Кроме того, опасны и разлетающиеся осколки.

В случае образования огневого шара [3] вследствие диспергирования имевшейся в сосуде горючей жидкости его диаметр  $D_{ш}$  ОГШ определяют по формуле

$$D_{ш} = 5,5 \cdot \sqrt[3]{M}, \text{ м,}$$

где  $M$  — масса диспергированной взрывом горючей жидкости, кг; время существования огневого шара находят из выражения

$$T = 0,38 \cdot \sqrt[3]{M}, \text{ с.}$$

## 2.2. Опасности взрывов сосудов, наполненных горючими сжиженными газами

Сжиженные горючие газы обладают большей взрывоопасной потенциальной энергией, чем сжатые горючие газы. При разрушении сосуда сжиженные горючие газы, войдя в контакт с атмосферой, находящейся при значительно более высокой температуре, за счёт поглощения теплоты из окружающей среды превращают потенциальную энергию в кинетическую энергию газов, образующихся вследствие интенсивного испарения криогенной жидкости. При испарении криогенной жидкости происходит её расширение в сотни раз, например сжиженный воздух расширяется в 760 раз\*.

При разрушении сосудов, наполненных горючими криогенными жидкостями (железнодорожные и автодорожные цистерны и стационарные резервуары для хранения сжиженных нефтяных газов) последствия происходящих взрывов особенно разрушительны. Это происходит как за счёт возникновения крупных, далеко разлетающихся частей цистерн и резервуаров, так и за счёт воспламенения паров с образованием ОГШ. Повышенная опасность происходит за счёт сложения потенциальной энергии криогенной жидкости и потенциальной химической энергии горючих газов.

Причинами разрушения указанных сосудов чаще всего являются коррозия оболочки сосудов, значительные помятости и, особенно, переполнение

---

\* По информации из Интернета (сайт «Сжиженный воздух»), британские инженеры создали двигатель, работающий на сжиженном воздухе. При впрыскивании в цилиндр двигателя, мало отличающегося от двигателя внутреннего сгорания, небольшой порции сжиженного воздуха поршень двигателя под давлением расширяющегося сжиженного воздуха приобретал большую скорость. С использованием этого двигателя был создан опытный образец автомобиля. Ведутся работы по созданию мощных стационарных двигателей.

Конец ознакомительного фрагмента.  
Приобрести книгу можно  
в интернет-магазине  
«Электронный универс»  
[e-Univers.ru](http://e-Univers.ru)