



Библиотека научных разработок и проектов НИУ МГСУ

# АВАРИЙНЫЕ ВЗРЫВЫ ГАЗОВОЗДУШНЫХ СМЕСЕЙ В АТМОСФЕРЕ



ВЗРЫВОБЕЗОПАСНОСТЬ

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования

«МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ СТРОИТЕЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

---

Библиотека научных разработок и проектов НИУ МГСУ

# АВАРИЙНЫЕ ВЗРЫВЫ ГАЗОВОЗДУШНЫХ СМЕСЕЙ В АТМОСФЕРЕ

Москва 2014

УДК 614.841  
ББК 38.96  
А18

СЕРИЯ ОСНОВАНА В 2008 ГОДУ

Рецензенты:

кандидат технических наук *В.А. Сулименко*,  
начальник учебно-научного комплекса  
процессов горения и экологической безопасности  
Государственной академии пожарной службы МЧС России;  
профессор, доктор технических наук *В.С. Боровков*,  
профессор кафедры гидравлики и водных ресурсов ФГБОУ ВПО «МГСУ»

*Монография рекомендована к публикации научно-техническим советом МГСУ*

Авторы:

Д.З. Хуснутдинов, А.В. Мишуев, В.В. Казеннов,  
А.А. Комаров, Н.В. Громов

**А18** **Аварийные** взрывы газоздушных смесей в атмосфере : монография /  
Д.З. Хуснутдинов [и др.] ; М-во образования и науки Росс. Федерации,  
Моск. гос. строит. ун-т. Москва : МГСУ, 2014. 80 с. (Библиотека научных  
разработок и проектов НИУ МГСУ).  
ISBN 978-5-7264-0880-4

На основе приведенных терминов и определений рассмотрены физические основы взрывов сосудов, работающих под давлением, детонационных и дефлаграционных взрывов. Приведены расчетные формулы для различных типов взрывов в объеме, необходимом для составления прогнозов воздействия ударных волн на здания и сооружения и разработки мероприятий по снижению материального ущерба и предотвращения людских потерь. Приведены примеры расчета параметров указанных взрывов. Даны описания двух реальных тяжелейших взрывов: сосудов, работающих под давлением, и внешнего дефлаграционного взрыва.

Для научных работников, инженеров-проектировщиков и работников сферы обеспечения взрывобезопасности различных объектов, технического персонала и сотрудников МЧС, студентов и аспирантов строительных специальностей.

**УДК 614.841**  
**ББК 38.96**

ISBN 978-5-7264-0880-4

© ФГБОУ ВПО «МГСУ», 2014

## 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.

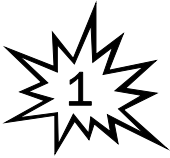
В разделе 2 представлены расчётные зависимости для определения параметров воздушной ударной волны (ВУВ) при взрывах сосудов, работающих под давлением. В этом разделе впервые даются формулы для определения импульсов воздействия и длительности действия положительной фазы ВУВ.

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: газозоудшная смесь (ГВС), газопарозоудшная 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.

*Огнево́й 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 С<sub>м</sub>.

*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 (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 ГПВС и ВВ могут взрываться различного рода мелкораздробленные 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, приводит 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

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение .....	3
1. Основные понятия о внешних аварийных взрывах .....	4
1.1. Термины и определения .....	4
1.2. Общая характеристика внешних аварийных взрывов .....	8
2. Расчет параметров воздушно-ударной волны при взрывах сосудов, работающих под давлением.....	12
2.1. Определение параметров воздушной ударной волны .....	12
2.2. Опасности взрывов сосудов, наполненных горючими сжиженными газами .....	19
3. Определение параметров детонационной волны и воздушной ударной волны детонационных взрывов газо- и паровоздушных смесей.....	24
3.1. Условия возникновения детонационных взрывов газо- и паровоздушных смесей. Исходные данные для выполнения расчетов .....	24
3.2. Определение параметров детонационной волны.....	27
3.3. Параметры воздушной ударной волны, генерированной детонационным взрывом, на различных расстояниях от центра взрыва .....	28
4. Дефлаграционные взрывы. Физика явления .....	35
4.1. Качественное описание дефлаграционных взрывов газо- и паровоздушных смесей.....	35
4.2. Метод получения расчетных зависимостей для определения параметров взрывной волны дефлаграционного взрыва.....	37
4.3. Экспериментальный профиль волны сжатия .....	41
4.4. Волновая диаграмма дефлаграционного взрыва .....	45

5. Определение параметров волны сжатия внешних дефлаграционных взрывов газо- и паровоздушных смесей .....	51
5.1. Оценка значений видимой скорости распространения пламени .....	51
5.1.1. Оценка значения не возмущенной внешним влиянием видимой скорости распространения пламени.....	52
5.1.2. Учет влияния внешних факторов на значения видимой скорости распространения пламени .....	54
5.1.3. Принятый закон изменения видимой скорости распространения пламени во времени.....	55
5.2. Параметры проходящей волны сжатия дефлаграционного взрыва.....	58
5.2.1. Значения параметров волны сжатия дефлаграционного взрыва в 1-й зоне до подхода фронта пламени .....	58
5.2.2. Параметры волны сжатия непосредственно перед фронтом пламени .....	59
5.2.3. Параметры волны сжатия в 1-й зоне за фронтом пламени ....	60
5.2.4. Временные характеристики волны сжатия в 1-й зоне за фронтом пламени.....	60
5.2.5. Расчетные зависимости для определения значений параметров волны сжатия во 2-й зоне за фронтом пламени ....	61
5.2.6. Временные характеристики волны сжатия во 2-й зоне за фронтом пламени.....	65
5.2.7. Законы изменения давления во времени во 2-й зоне дефлаграционного взрыва .....	65
5.3. Взаимодействие взрывной волны дефлаграционного взрыва с преградами.....	69
5.3.1. Нагрузки, возникающие на преградах .....	69
5.3.2. Обтекание фронтальной стены волной сжатия.....	69
5.3.3. Установление процесса обтекания.....	70
5.3.4. Нагрузки на покрытие и боковые стены сооружения в виде параллелепипеда .....	70
5.3.5. Затекание за тыльную сторону сооружения в виде параллелепипеда .....	71
5.3.6. Нагрузки на ограждающую поверхность кругового цилиндра.....	72
Библиографический список .....	75
Приложение. Описание взрывной аварии, связанной с внешним дефлаграционным взрывом, произошедшим в 1999 г. в Башкирии .....	76

*Научное издание*

**Хуснутдинов Джабат Зайнутдинович,  
Мишуев Адольф Владимирович,  
Казеннов Вячеслав Васильевич и др.**

**АВАРИЙНЫЕ ВЗРЫВЫ  
ГАЗОВОЗДУШНЫХ СМЕСЕЙ В АТМОСФЕРЕ**

Редактор *А.К. Смирнова*  
Корректор *А.К. Смирнова*  
Компьютерная верстка и обработка иллюстраций *С.А. Глембовецкого*  
Дизайн обложки *Д.Л. Разумного*

Подписано в печать 18.07.2014 г. И-24. Формат 60×84/16.  
Уч.-изд. л. 5,4. Усл.-печ. л. 4,65. Тираж 100 экз. Заказ 289

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«Московский государственный строительный университет».  
129337, Москва, Ярославское ш., 26.  
Издательство МИСИ – МГСУ.  
Тел. (495) 287-49-14, вн. 13-71, (499) 188-29-75, (499) 183-97-95.  
E-mail: [ric@mgsu.ru](mailto:ric@mgsu.ru), [rio@mgsu.ru](mailto:rio@mgsu.ru).  
Отпечатано в типографии Издательства МИСИ – МГСУ.  
Тел. (499) 183-91-90, (499) 183-67-92, (499) 183-91-44