

639.819

Г59 М. Г. Годжелло

РАСЧЕТ ПЛОЩАДИ  
ЛЕГКОСБРАСЫВАЕМЫХ  
КОНСТРУКЦИЙ  
ДЛЯ ЗДАНИЙ  
И СООРУЖЕНИЙ  
ВЗРЫВООПАСНЫХ  
ПРОИЗВОДСТВ



## СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие . . . . .	3
Взрыв смесей горючих газов, паров и твердых веществ с воздухом (кислородом) . . . . .	4
Условия развития взрыва . . . . .	4
Нормальная скорость горения . . . . .	6
Скорость нарастания давления . . . . .	6
Расчет площади легкобрасываемых конструкций зданий и сооружений взрывоопасных производств . . . . .	11
Избыточный объем газообразных продуктов горения . . . . .	14
Скорость истечения продуктов горения в атмосферу . . . . .	16
Время истечения продуктов горения через проемы, образовавшиеся при взрыве . . . . .	17
Расчет дифференцированной нормы площади ЛСК . . . . .	19
Условия применения расчетных дифференцированных норм площади ЛСК . . . . .	23
Действие взрыва на ограждающие конструкции зданий . . . . .	29
Явление дефлаграции . . . . .	29
Продолжительность действия ударной волны на строительные конструкции . . . . .	31
Методика расчета энергетического (тротилового) эквивалента . . . . .	37
Работа и мощность взрыва . . . . .	38
<i>Приложение 1.</i> Нормальная скорость горения газов и паров в смеси с воздухом и кислородом в зависимости от состава . . . . .	39
<i>Приложение 2.</i> Характеристики взрывоопасности газо- и паровоздушных смесей и аэрозвесей . . . . .	41
<i>Приложение 3.</i> Энергетические (тротилловые) эквиваленты горючих веществ при взрыве в воздухе и кислороде . . . . .	45

*Михаил Георгиевич Годжелло*

### РАСЧЕТ ПЛОЩАДИ ЛЕГКОБРАСЫВАЕМЫХ КОНСТРУКЦИЙ ДЛЯ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ ВЗРЫВООПАСНЫХ ПРОИЗВОДСТВ

Редакция литературы по жилищно-коммунальному хозяйству  
Зав. редакцией М. К. Склярова  
Редактор Н. С. Куприянова  
Мл. редактор Г. А. Морозова  
Технический редактор Г. В. Климушкина  
Корректор Л. М. Вайнер

ИБ № 2520

Сдано в набор 5.06.80. Подписано в печать 3.02.80.  
Формат 84×108<sup>1/2</sup>. Бум. тип. № 2. Гарнитура «Литературная»  
Печать высокая. Усл. печ. л. 2,52. Уч. изд. л. 2,66  
Изд. № AVI—8371. Тираж 10000 экз. Зак. № 104. Цена 15 коп.

*Стройиздат*

101442, Москва, Калевская, 23а

Калужское производственное объединение «Полиграфист»,  
пл. Левина, 5



М. Г. Годжелло

# РАСЧЕТ ПЛОЩАДИ ЛЕГКОБРАСЫВАЕМЫХ КОНСТРУКЦИЙ ДЛЯ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ ВЗРЫВООПАСНЫХ ПРОИЗВОДСТВ



МОСКВА

СТРОЙИЗДАТ

1981



Печатается по решению секции литературы по противопожарной технике редакционного совета Стройиздата.

Рецензенты: начальник кафедры пожарной профилактики в строительном деле ВИПТШ МВД СССР, канд. техн. наук М. Я. Ройтман, ректор МИСИ им. В. В. Куйбышева, д-р техн. наук Н. А. Стрельчук.

**Годжелло М. Г.**

Г59 Расчет площади легкобрасываемых конструкций для зданий и сооружений взрывоопасных производств. — М.: Стройиздат, 1981. — 48 с., ил.

Приведен расчет площади легкобрасываемых конструкций (ЛСК) промышленных зданий и сооружений с учетом возможной аварийной загазованности помещения смесью горючих веществ с воздухом во взрывоопасных соотношениях. Предложена классификация взрывоопасных сред и дифференцированных норм площади ЛСК.

Предназначена для инженерно-технических работников проектных организаций и пожарной охраны.

В связи с внедрением принципиально новых технологических процессов, позволяющих интенсифицировать производства многих отраслей народного хозяйства, увеличением числа строящихся и реконструируемых предприятий химической, нефтехимической, нефтеперерабатывающей промышленности и других пожаровзрывоопасных производств особенно возрастает роль строительнотехнических мероприятий по обеспечению безопасности людей при пожарах и взрывах, а также сокращению возможного ущерба от них. Для локализации взрывов газо- и пылевоздушных смесей в помещениях СНиП II-М-2-72 «Производственные здания промышленных предприятий. Нормы проектирования» предусмотрено устройство легкобрасываемых конструкций.

В книге показана возможность расчета норм площади ЛСК. Особенностью расчетного метода является дифференцированный подход к нормированию, а также использование наряду с традиционными характеристиками пожарной опасности веществ дополнительных показателей взрывоопасности — скорости и времени нарастания давления, энергии зажигания и энергетического (тротилового) эквивалента. В качестве исходного параметра принята возможная (при авариях) загазованность (запыленность) проектируемого помещения.

В книге использованы работы А. Н. Баратова, И. С. Бурлакова, Е. Н. Иванова, В. Т. Монахова, А. И. Розловского, М. Я. Ройтмана, Я. К. Трошина, экспериментальные данные ордена Ленина Института химической физики АН СССР и ордена Ленина Института физики земли им. О. Ю. Шмидта АН СССР, а также результаты определения норм площади ЛСК, проведенные автором и научными сотрудниками ВНИИПО З. В. Коршак и Н. И. Назаровым.

Автор выражает благодарность М. В. Алексееву, П. Г. Демидову и М. Я. Ройтману за ценные советы и замечания, сделанные ими в процессе работы над книгой.

# ВЗРЫВ СМЕСЕЙ ГОРЮЧИХ ГАЗОВ, ПАРОВ И ТВЕРДЫХ ВЕЩЕСТВ С ВОЗДУХОМ (КИСЛОРОДОМ)



## УСЛОВИЯ РАЗВИТИЯ ВЗРЫВА

Взрывом называется физическое и химическое превращение вещества, сопровождающееся быстрым выделением энергии, что приводит к разогреву, сжатию продуктов взрыва и окружающей среды, резкому изменению давления. Мгновенное изменение давления является основным признаком взрыва.

Взрыв смесей горючих газов, паров и твердых веществ с воздухом (газо-, пылевоздушных смесей) относится к химическому превращению, основой которого является реакция горения (окисления).

Условиями, которым должна удовлетворять реакция горения для того, чтобы она могла протекать в форме взрыва, являются:

экзотермическое химическое превращение; большая скорость реакции; способность реакции к самораспространению; продукты реакции полностью или частично газообразные.

Горение газо-, пылевоздушных смесей возможно только при определенных соотношениях компонентов, называемых пределами воспламенения. Наименьшая концентрация горючего вещества в смеси, способной воспламениться от источника зажигания, называется нижним пределом воспламенения, а наибольшая — верхним пределом воспламенения.

Пределы воспламенения горючих газов и паров выражаются в объемных долях горючего вещества в смеси с воздухом (окислителем). Для аэрозвесей, металлических и металлических порошков пределы воспламенения выражаются в граммах горючего вещества на кубический метр ( $г/м^3$ ) или в миллиграммах на литр ( $мг/л$ ). Пересчет объемных долей газов и паров в массовые при температуре  $20^{\circ}C$  ( $293 K$ ) и давлении  $760$  мм рт. ст. производится приблизительно по соотношениям.

$$V = 0,41/M; \quad m = 2,4/M,$$

где  $V$  — объемная доля, %;  $m$  — массовая доля,  $г/м^3$ ;  $M$  — молярная масса,  $кг/моль$ .

При горении газо-, пылевоздушной смеси в замкнутом объеме давление зависит от концентрации горючего вещества. Если концентрация горючего вещества превысит нижний предел воспламенения, то давление при взрыве возрастет до максимального. Это давление соответствует примерно (с некоторым превышением) стехиометрическому соотношению горючего вещества и воздуха. Если концентрация горючего вещества больше стехиометрической, давление при взрыве понижается.

На значение избыточного давления смеси продуктов взрыва влияют объем продуктов сгорания и их температура.

При адиабатном, т. е. не сопровождающемся тепловыми потерями, сгорании, температура газообразных продуктов зависит от их теплоемкости и теплового эффекта реакции. Если горение происходит при постоянном объеме, эта температура называется теоретической температурой взрыва. Теоретическая температура взрыва газо-, пылевоздушных смесей  $2400—3000 K$ .

В действительности температура взрыва газо-, пылевоздушных смесей значительно ниже теоретической, так как в смесях часто содержится избыток воздуха или горючего вещества, которые не вступают в реакцию, происходит диссоциация продуктов взрыва и потеря тепла излучением. Расчеты и замеры показывают, что фактическая температура взрыва равна  $0,4—0,6$  теоретической.

Ниже приведены экспериментально определенные температуры горения водородно-воздушных смесей:

Объемная доля водорода, %	Температура горения смеси, K	Характеристика смеси
0,1	1150	Бедная—избыток воздуха
0,125	1200	То же
0,2	1650	
0,33	2430	Богатая—избыток водорода

Определена температура горения для бедных газо-воздушных смесей, близких по составу к предельным (метана —  $1054$ , водорода —  $855$ , ацетилена —  $850 K$ ).



Результаты исследований теплового режима горения бедных воздушных смесей подтверждают, что температура горения бедных смесей углеродсодержащих горючих постоянна (около 1600 К). При эндотермических реакциях горения (горение этилена, ацетилен, окиси этилена) температура на 200 К ниже.

В условиях локальной загазованности помещений объемом более 1000 м<sup>3</sup> бедными или богатыми газопылевоздушными смесями за расчетную температуру истечения продуктов взрыва в атмосферу принимают 1000—1500 К. При локальной загазованности крупных технологических сооружений горючими газами, парами и аэрозольными до близких к стехиометрическим концентрациям расчетную температуру истечения продуктов взрыва принимают 1600 К.

### НОРМАЛЬНАЯ СКОРОСТЬ ГОРЕНИЯ

Горение называется нормальным, если распространение невозмущенного пламени происходит по нормали к любому участку его поверхности. Скорость перемещения пламени по неподвижной горючей среде вдоль нормали к его поверхности называется нормальной скоростью горения (распространения пламени)  $u_n$ . Нормальная скорость горения характеризует пожарную опасность газов и жидкостей и используется для расчета площади ЛСК зданий взрывоопасных производств. В справочной литературе приводятся значения нормальной скорости горения, относящиеся к стехиометрическому составу газопаровоздушных смесей. Для расчета площади ЛСК обычно пользуются значениями скорости горения для бедных смесей.

По кривым зависимости нормальной скорости горения от состава газопаровоздушных смесей (рис. 1 и 2) можно приближенно определить уменьшение нормальной скорости горения бедных и богатых смесей до 40—20 см/с (прил. 1).

### СКОРОСТЬ НАРАСТАНИЯ ДАВЛЕНИЯ

Характерной особенностью процесса горения в замкнутом объеме является неравномерность распределения температуры образующихся продуктов. Такое явление объясняется изменением давления в объеме по мере вы-

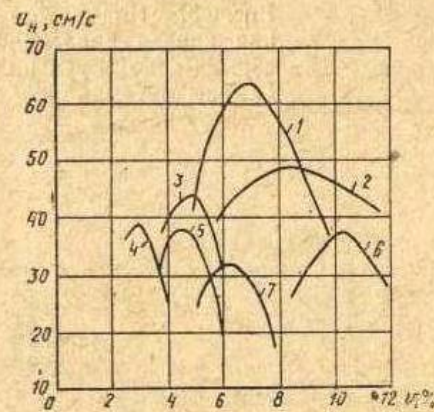


Рис. 1. Зависимость нормальной скорости горения газопаровоздушных смесей от состава

1 — этилен; 2 — сероуглерод; 3 — пропилен; 4 — бензол; 5 — диэтиловый эфир; 6 — метан; 7 — ацетон

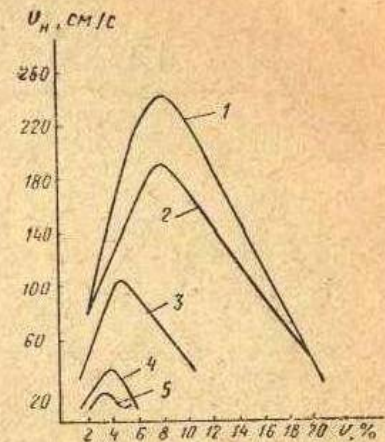


Рис. 2. Зависимость нормальной скорости горения гексано-кислородно-азотных смесей от содержания кислорода

1 — чистый кислород 100%; 2 — 80%; 3 — 40%; 4 — 20%; 5 — 16,4%

горения смеси, так как горение газа в центре сосуда протекает при начальном давлении, а у стенки сосуда — при повышенном давлении.

Давление при горении бедной газовой смеси в сферическом сосуде рассчитывают по формуле

$$p = p_0 [1 + m(\eta T / T_0 - 1)],$$

где  $p_0$  — начальное давление, кгс/см<sup>2</sup>;  $p$  — конечное давление, кгс/см<sup>2</sup>;  $m$  — доля сгоревшей газовой смеси;  $\eta$  — изменение числа молекул при реакции в пламени (значение  $\eta$  близко к единице);  $T_0$  — начальная температура, К;  $T$  — конечная температура, К.

Приведенную выше формулу можно использовать для приближенного расчета ожидаемого давления при взрыве бедной смеси в помещении.

**Пример:** Определить давление в помещении, загазованном метановоздушной смесью. Дано:  $m=0,06$ ;  $\eta=1$ ;  $T_0=300$  К;  $T=1000$  К.

Решение.  $p=1[1+0,06(1 \cdot 1000/300-1)] \approx 1,2$  кгс/см<sup>2</sup>.

При оценке воздействия взрыва на ограждающие конструкции зданий и сооружений основными характеристиками являются скорость нарастания давления и время достижения заданного или максимального давления. Эти параметры обычно измеряют в замкнутых аппара-

$p, \text{кгс/см}^2$

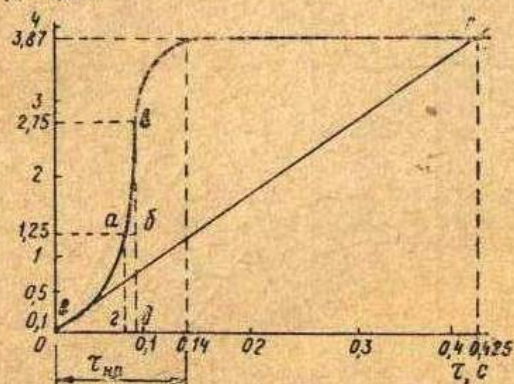


Рис. 3. Индикаторная кривая давления взрыва во времени (в замкнутом аппарате)



рукции зданий. Дано:  $p_{\text{доп}} = 0,1 \text{ кгс/см}^2$  и заданная скорость нарастания давления  $10 \text{ кгс/(см}^2 \cdot \text{с)}$ .

Решение. Из точки  $e$  (см. рис. 3), ордината которой соответствует  $p_{\text{доп}} = 0,1 \text{ кгс/см}^2$ , проводим касательную  $ec$  до пересечения с кривой. Точка  $c$  соответствует времени нарастания давления  $0,425 \text{ с}$ , скорость нарастания давления  $u_{\text{взр}} = 3,87/0,425 = 9 \text{ кгс/(см}^2 \cdot \text{с)}$ .

По индикаторным кривым (рис. 4) для водородно-воздушных смесей можно определить скорость нарастания давления. Для смеси, содержащей 10% (по объему) водорода,  $u_{\text{взр}} = 3,2/0,25 = 12,8 \text{ кгс/(см}^2 \cdot \text{с)}$ . Для смеси, содержащей 60% водорода (по объему),  $u_{\text{взр}} = 5,7/0,03 = 190 \text{ кгс/(см}^2 \cdot \text{с)}$ ;  $\tau_{\text{н.д.}} = 29,4 \text{ мс}$ .

Расчетные скорости нарастания давления и времени нарастания давления для различных веществ приведены в прил. 2.

Минимальное время нарастания давления ( $\tau_{\text{н.д.}}$ ) для стехиометрических различных воздушных смесей (прил. 2) — около 0,01 с и только для отдельных порошков органических веществ и цветных металлов снижается до 0,006—0,009 с.

В результате исследований в замкнутых малогабаритных сосудах определено, что зависимость расчетного времени нарастания давления от объема помещения может быть выражена формулой

$$\tau_{\text{н.д.}} = k \sqrt[3]{V_{\text{пом}}}$$

где  $k$  — коэффициент для реальных помещений (0,01), соответствует минимальному времени нарастания давления при взрыве наиболее взрывоопасных аэрозвесей и горючих газовых смесей.

Проверим эту формулу для реальных объемов:

$V_{\text{пом}}$	$\tau_{\text{н.д.}}$	$V_{\text{пом}}$	$\tau_{\text{н.д.}}$
216	0,06	1000	0,1
512	0,08	2000	0,13
730	0,09		

Расчетное значение времени нарастания давления в объеме 216 м<sup>3</sup> соответствует опытным данным для следующих газо-, паровоздушных стехиометрических смесей: бутана, бензола, бензина, диэтилового эфира, гексана и др. (см. прил. 2).

При увеличении объема помещения с 200 до 2000 м<sup>3</sup> время нарастания давления увеличивается примерно в 2 раза. Зависимость скорости нарастания давления от объема сосуда проверяли (в ФРГ) при исследовании

$p, \text{кгс/см}^2$

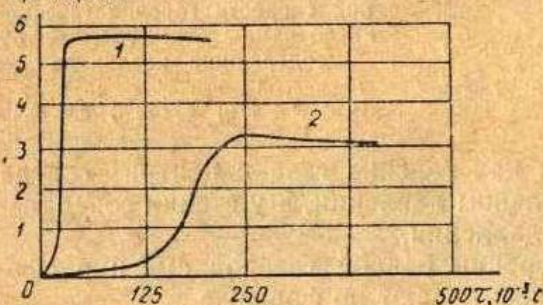


Рис. 4. Индикаторные кривые нарастания давления взрыва водородно-воздушных смесей во времени

1 — объемная доля водорода 66%; 2 — объемная доля водорода 10%

тах и фиксируют на графиках «давление — время», которые называют также индикаторными кривыми.

На индикаторной кривой (рис. 3) видно, что максимальное давление 3,87 кгс/см<sup>2</sup> достигается за 0,14 с (время нарастания давления  $\tau_{\text{н.д.}} = 0,14 \text{ с}$ ). На участке кривой  $av$  за 0,009 с давление возросло на 1,5 кгс/см<sup>2</sup>, т. е. скорость нарастания давления на этом участке

$$u_{\text{взр}} = \Delta p / \Delta \tau = 1,5 / 0,009 = 166 \text{ кгс/(см}^2 \cdot \text{с)}$$

Таким образом, опасность разрушения защищаемого от взрыва помещения в большей мере зависит от времени нарастания давления  $\tau_{\text{н.д.}}$ , чем от времени достижения максимального давления взрыва, так как значительно более опасно, если индикаторная кривая «давление — время взрыва» имеет участки очень большой крутизны.

**Пример:** Определить графически время нарастания давления, не превышающего допустимых нагрузок на ограждающие конст-



взрыва пыли в замкнутых аппаратах объемом 1 и 20 м<sup>3</sup>.  
На основании опытов получено уравнение

$$(\Delta p / \Delta \tau)_1 V_1^{1/3} = (\Delta p / \Delta \tau)_2 V_2^{1/3}.$$

**Пример:** В камере объемом  $V_1 = 2 \text{ м}^3$  при взрыве пропано-воздушной смеси зафиксировано максимальное давление  $\Delta p = 7,4 \text{ кгс/см}^2$ , достигнутое за 0,03 с. Определим время нарастания такого же давления в камере объемом  $V_2 = 200 \text{ м}^3$ . На основе приведенной выше зависимости можно утверждать, что в объеме  $V_2$  давление будет нарастать медленнее в 4,65 раза. Следовательно, давление 7,4 кгс/см<sup>2</sup> в объеме 200 м<sup>3</sup> будет достигнуто за время  $\tau_{н.д.} = 0,03 \cdot 4,65 = 0,14 \text{ с}$ . Скорость нарастания давления в первом случае

$$u'_{взр} = \Delta p / \Delta \tau = 7,4 / 0,03 = 247 \text{ кгс} / (\text{см}^2 \cdot \text{с}),$$

во втором случае

$$u''_{взр} = \Delta p / \Delta \tau = 7,4 / 0,14 = 52,8 \text{ кгс} / (\text{см}^2 \cdot \text{с}).$$

По индикаторным кривым можно рассчитывать средние и максимальные скорости нарастания давления для любых объемов.

Следовательно, для расчета времени нарастания давления в больших помещениях рекомендуется пользоваться формулой

$$\tau_{н.д.} = k \sqrt[3]{V_{пом.}}$$

При расчетах площади ЛСК для условий нормального (ламинарного) горения газо- и паровоздушных смесей были сделаны следующие допущения:

выделяющееся при взрыве тепло расходуется на нагрев смеси продуктов горения, избыточного воздуха или горючего вещества; теплотери на излучение и нагрев ограждающих конструкций и оборудования не учитываются;

объем продуктов горения рассчитывают по реакции горения в воздухе с учетом концентрации горючего вещества в смеси с воздухом (загазованности, запыленности помещения);

избыточный объем газообразных продуктов горения рассчитываются без учета диссоциации продуктов горения (СО<sub>2</sub>, Н<sub>2</sub>О, N<sub>2</sub> и др.);

при локальной загазованности крупных помещений (1000\* — 5000 м<sup>3</sup>) до образования бедных газоздуш-

\* Здесь и далее 1000 м<sup>3</sup> считается предельным объемом малогабаритных производственных помещений.

ных смесей расчетная температура истечения продуктов горения принимается 1000—1500 К; при локальной загазованности до достижения концентрации горючего вещества, приближающейся к стехиометрической (особенно для веществ с узкими пределами воспламенения), расчетную температуру истечения продуктов горения принимают 1600 К;

при полной (объемной) загазованности малогабаритных помещений, а также технологических сооружений до образования концентрации горючего, близкой к стехиометрической, за расчетную температуру истечения продуктов горения рекомендуется принимать 1600 К или использовать экспериментальные данные;

уменьшение скорости нарастания давления в объемах помещений по сравнению с установленной при лабораторных исследованиях приближенно оценивают по кубической зависимости, полученной в замкнутых аппаратах;

скорость истечения продуктов сгорания через проемы в атмосферу рассчитывают по формулам, выведенным из термодинамической формулы для идеальных газов с учетом температур и соотношения давлений.

### РАСЧЕТ ПЛОЩАДИ ЛЕГКОСБРАСЫВАЕМЫХ КОНСТРУКЦИЙ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ ВЗРЫВООПАСНЫХ ПРОИЗВОДСТВ

Исследованиями установлено, что около 60% взрывов связано с утечками газов из оборудования и распределительных газопроводов. В химической, нефтехимической и других отраслях промышленности для предупреждения взрывов устраивают приспособления для аварийного слива, отсоса пыли около пылеобразующего оборудования, азотную защиту паровой фазы в аппаратах с взрывоопасными продуктами, специальные трубопроводы для сбрасывания давления в атмосферу; отдельные аппараты защищают разрывными металлическими мембранами.

Для предотвращения аварий, связанных с загазованностью помещений, применяют устройства аварийной защиты и сигнализации типа АЗИС с датчиком сигнализатора довзрывных концентраций СВК-3М; «Логика», стационарный термохимический сигнализатор СДВК-1 и др.



В правилах технической эксплуатации резервуаров для нефтепродуктов приводят рекомендации по определению потерь паров горючих жидкостей через дыхательную аппаратуру и огнепреохранители при перекачке из одной емкости в другую («большое дыхание») и при изменениях температурных условий хранения («малое дыхание»).

Запыленность производственных помещений преимущественно создается пылеобразующим технологическим оборудованием (дробильными машинами, рассевами, транспортными механизмами и др.). При этом осевшая на оборудовании, вентиляционных коробах и строительных конструкциях горючая пыль — особенно мелких фракций 10—40 мкм — представляет опасность большую, чем взвешенная пыль, поскольку она при переходе во взвешенное состояние в отличие от газовых смесей принимает участие в развитии повторных взрывов, разрушающее действие которых больше, чем взрывов газов (прил. 2).

В крупных технологических сооружениях (бункерах пылевидной продукции, пылесадительных камерах, изолированных кабинах, сушильных и окрасочных камерах компрессорных и насосных) создается полная (объемная) загазованность или запыленность.

**Основные исходные данные.** Для расчета площади ЛСК предварительно устанавливают степень пожарной опасности проектируемого помещения и технологического процесса в целом и взрывную и взрывопожарную опасность в соответствии с СН 463-74 «Указаниями по определению производств по взрывной, взрывоопасной и пожарной опасности» и СНиП II-M. 2-72 «Производственные здания промышленных предприятий. Нормы проектирования». Категорию производства определяют по аварийным условиям, т. е. по поступлению в помещение взрывоопасных веществ и образованию взрывоопасных смесей в объеме, превышающем 5% свободного помещения. Свободный объем производственного помещения определяют как разность между геометрическим объемом помещения и объемом, занимаемым оборудованием. Если свободный объем помещения определить невозможно, то допускается принимать его условно равным 80% геометрического объема. При определении свободного объема помещений учитывают работу аварийной вентиляции [3].

Расчетный объем взрывоопасной газо- или паровоздушной смеси, в котором поступившее в помещение (из аппарата, трубопровода или в результате испарения) вещество может образовать взрывоопасную концентрацию, соответствующую нижнему пределу воспламенения, определяют по формуле [3].

$$V = 1,5E/C,$$

где  $V$  — расчетный объем взрывоопасной смеси, м<sup>3</sup>; 1,5 — коэффициент запаса;  $C$  — нижний концентрационный предел воспламенения вещества, г/м<sup>3</sup>;  $E$  — количество поступивших в помещение веществ, г;

$$E = E_a + E_r + E_{ii},$$

где  $E_a$  — количество вещества, поступившего из аппарата, г;  $E_r$  — количество вещества, поступившего из трубопроводов, г;  $E_{ii}$  — количество вещества, поступившего в результате испарений, г.

После определения категории взрывопожароопасности проектируемого производства для расчета дифференцированной нормы площади ЛСК уточняют степень (полной или частичной) загазованности (запыленности) помещения и содержание горючего вещества в смеси с воздухом.

Для горючих промышленных пылей при расчете запыленности свободного объема помещения автор рекомендует принимать расчетные концентрации аэрозвесей в пределах 65—100 г/м<sup>3</sup>; для наиболее взрывоопасных пылей, с нижним пределом воспламенения 2—20 г/м<sup>3</sup>, 5-кратные значения нижних пределов, но не менее 65 г/м<sup>3</sup>, а для остальных — 1,5—2-кратные значения нижних пределов.

При полном сгорании расчетного объема взрывоопасной смеси примерный объем газообразных продуктов сгорания определяют из выражения

$$V_{взр} > V_{пом} \cdot 0,05 \cdot k = V_{з.р.}$$

где  $V_{взр}$  — расчетный объем взрывоопасной смеси, м<sup>3</sup>;  $V_{пом}$  — свободный объем помещения, м<sup>3</sup>;  $V_{пом} \cdot 0,05$  — объем загазованной зоны, равной 5% объема помещения;  $k$  — коэффициент (степень) расширения продуктов сгорания;

$$k = p_{взр} / p_0 = \eta T_r / T_0,$$

где  $\eta = m/n$  — изменение числа молекул при реакции горения,  $\eta$  — близко к единице;  $V_{з.р.}$  — объем зоны расширения продуктов сгорания, м<sup>3</sup>.

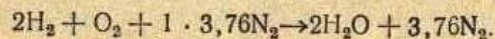
При расчетах зон аварийной частичной (локальной) загазованности  $V_{з.з}$  и расширения  $V_{з.р}$  можно для всех углерод-содержащих горючих веществ принимать  $k=4-5$ , что соответствует расчетным температурам истечения  $T_{ист} = 1200-1500$  К.

### ИЗБЫТОЧНЫЙ ОБЪЕМ ГАЗООБРАЗНЫХ ПРОДУКТОВ ГОРЕНИЯ

Объем газообразных продуктов, образующихся при взрыве (сгорании) горючих веществ в воздухе, является основным параметром для расчета площади ЛСК, зависящим от степени загазованности проектируемого помещения, расчетной температуры горения  $T_r$  в очаге и расчетной температуры истечения в атмосферу  $T_{ист}$  смеси продуктов горения с воздухом или с горючим веществом.

Для обеспечения запаса надежности принимают, что помещение герметичное, а выход продуктов сгорания теоретический.

**Пример:** Малогабаритное сооружение объемом  $600 \text{ м}^3$  полностью загазовано бедной водородно-воздушной смесью, в которой содержится  $8,3 \text{ г/м}^3$  водорода. Объем продуктов горения рассчитывают по реакции горения водорода в воздухе:



Изменение числа молекул при реакции  $\eta = m/n = 5,76/6,75 = 0,85$ ;  $4,032 \text{ г}$  водорода при нормальных условиях образуют объем газообразных продуктов сгорания  $V_{пр.г}^0 = 5,76 \cdot 22,4 = 128 \text{ л/м}^3$ .

В  $1 \text{ м}^3$  объема при нормальных условиях из  $8,3 \text{ г}$  водорода при сгорании образуется газообразных продуктов.

$$V_{пр.г}^0 = 8,3 \cdot 128/4,03 = 265 \text{ л} \approx 0,27 \text{ м}^3$$

Объем избыточного воздуха в  $1 \text{ м}^3$

$$V_{изб.в}^0 = 1000 - (8,3/2 \cdot 22,4 + 8,3 \cdot 4,76 \cdot 22,4/4,03) = 688 \text{ л, или} \approx 0,69 \text{ м}^3$$

Суммарный объем газообразных продуктов взрыва в объеме помещения

$$V_{пр.г}^0 = (0,27 + 0,69) \cdot 600 = 576 \text{ м}^3$$

Избыточный объем продуктов горения  $\Delta V_f$  в смеси с воздухом при истечении в атмосферу определяют как суммарный объем смеси при расчетной температуре. Для  $10\%$ -ной ( $8,3 \text{ г/м}^3$ )



смеси водорода с воздухом принимаем расчетную температуру  $T_{ист} = 1350 \text{ К}$ .

Объем продуктов взрыва при истечении в атмосферу

$$V_f = 576 \cdot 1350/300 = 2500 \text{ м}^3$$

Избыточный объем

$$\Delta V_f = 2500 - 600 = 1900 \text{ м}^3$$

Ожидаемое избыточное давление в объеме помещения

$$\Delta p = 1900/600 = 3,16 \text{ кгс/см}^2$$

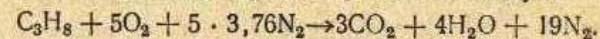
В расчетах избыточного объема продуктов горения в крупногабаритных, частично загазованных помещениях определяют объем взрывоопасной смеси, в которой при аварийном состоянии могут образоваться взрывоопасные смеси, превышающие  $5\%$  свободного объема помещения.

Кроме того, рекомендуется из полного объема помещения условно выделить зону расширения продуктов горения равную  $3-4$ -кратному объему загазованной зоны. В пределах этих зон рассчитывают объем продуктов горения с поправкой на расчетную температуру истечения, а также ожидаемое избыточное давление в каждой зоне и в объеме помещения.

**Пример:** В помещении объемом  $17500 \text{ м}^3$ , в которое выделяются горючие жидкости и газы, в аварийных условиях возможен выброс из аппаратов жидкого пропана с образованием взрывоопасной смеси в объеме загазованной зоны  $1200 \text{ м}^3$  (содержание пропана  $54 \text{ г/м}^3$ ). Это производство без расчета было отнесено к категории А.

Требуется определить избыточный объем продуктов горения для локальной зоны  $V_{з.р} = 5000 \text{ м}^3$  и ожидаемое избыточное давление.

**Решение.** Реакция горения пропана в воздухе



Изменение числа молекул при горении  $m/n = 26/25 = 1,04$ .

Из  $44 \text{ г}$  пропана при нормальных условиях образуется  $26 \cdot 22,4 = 580 \text{ л}$  газообразных продуктов сгорания; в  $1 \text{ м}^3$  содержится

$$V_{пр.г}^0 = 54 \cdot 580/44 = 710 \text{ л, или} 0,71 \text{ м}^3$$

В  $1 \text{ м}^3$  находится избыточного воздуха

$$V_{изб.в}^0 = 1000 - (54 \cdot 22,4/44 + 54 \cdot 24 \cdot 22,4/44) = 318 \text{ л, или} 0,32 \text{ м}^3$$

\* При локальной загазованности практически достаточно принять коэффициент расширения  $\varepsilon = T_r/T_0 = 3-4$ , что соответствует средней температуре смеси  $900-1200 \text{ К}$ ; при полной загазованности  $\varepsilon \approx 5$ , что соответствует температуре горения  $1500-1600 \text{ К}$ .

Суммарный объем газообразных продуктов в объеме загазованной зоны

$$V_{г. пр. з.з}^0 = (0,71 + 0,32) \cdot 1200 = 1236 \text{ м}^3.$$

Избыточный объем продуктов горения в смеси с воздухом при истечении в атмосферу определяют для температуры истечения. В соответствии с принятыми допущениями, а также с учетом узких пределов воспламенения пропана и низкой стехиометрии для заданных условий за расчетную температуру истечения продуктов горения принимаем  $T_{ист} = 1500 \text{ К}$

$$V_{г. з. з} = 1236 \cdot 1500/300 = 6200 \text{ м}^3, \Delta V_{г. з. з} = 6200 - 1200 = 5000 \text{ м}^3.$$

Ожидаемое давление в зоне загазованности

$$\Delta p_{з. з} = 5000/1200 = 4,2 \text{ кгс/см}^2.$$

В заданной локальной зоне ( $5000 \text{ м}^3$ ) при взрыве в загазованной зоне ( $1200 \text{ м}^3$ ) увеличение объема продуктов взрыва будет происходить при более низкой температуре  $900-1000 \text{ К}$ . Примем для расчета температуру  $1000 \text{ К}$

$$V_{г. 1000} = 5000 \cdot 1000/300 = 16650 \text{ м}^3;$$

$$\Delta p_{5000} = 16650/5000 = 3,3 \text{ кгс/см}^2.$$

### СКОРОСТЬ ИСТЕЧЕНИЯ ПРОДУКТОВ ГОРЕНИЯ В АТМОСФЕРЕ

Скорость истечения продуктов горения в смеси с избыточным воздухом или горючим веществом зависит от температуры этой смеси и соотношения давлений на ограждающие конструкции здания — допустимого и атмосферного. В расчете площади ЛСК этот параметр используют также при определении объемного расхода истекающих газов и паров ( $Q_c$ ).

В расчетах скорости истечения продуктов горения различных топлив и технических газов широко используются выражения, которые выводятся из термодинамической формулы

$$v = \varphi \sqrt{2gk/(k-1) \cdot p_1 \cdot V_t [1 - (p_2/p_1)^{(k-1)/k}]}, \quad (1)$$

где  $v$  — скорость истечения газов, м/с;  $\varphi$  — коэффициент расхода ( $0,75-0,8$ );  $g$  — нормальное ускорение свободного падения,  $9,807 \text{ м/с}^2$ ;  $k$  — отношение теплоемкостей  $c_p/c_v$  ( $1,4$ );  $p_1$  — абсолютное давление в системе,  $\text{кгс/м}^2$ ;  $p_2$  — атмосферное давление,  $\text{кгс/м}^2$ ;  $V_t$  — удельный объем продуктов горения,  $\text{м}^3/\text{кг}$  (зависит от плотности воздуха, температуры и давления);  $V_t = 1/1,29 \cdot T_{ист} / T_0 \cdot p_2/p_1$ .



Пример. Принимаем абсолютное давление в системе равным допустимой нагрузке на ограждающие конструкции зданий и сооружений  $p_1 = 1,15 \cdot 10^4 \text{ кгс/м}^2$ ,  $p_2 = 1 \cdot 10^4 \text{ кгс/м}^2$ ,  $T_0 = 273 \text{ К}$ . По формуле (1) после преобразований получим:

$$v = 0,75 \sqrt{\frac{2 \cdot 9,807 \cdot 1,4/1,4 - 1 \cdot 1,15 \cdot 10^4}{273 \cdot 1,29} \cdot T_{ист} \cdot \left[1 - \frac{1}{1,15}^{(1,4-1)/1,4}\right]} =$$

$$= 0,75 \sqrt{\frac{685 \cdot 1 \cdot 10^4 \cdot 0,04}{352} \cdot T_{ист}} = 6,7 \sqrt{T_{ист}}$$

$$v = k \sqrt{T_{ист}},$$

где  $v$  — скорость истечения, м/с;  $k$  — коэффициент, зависящий от  $p_{доп}$ ; для  $p_{доп} = 0,05-0,15 \text{ кгс/см}^2$   $k = 3,9-6,7$ .

Для расчетов скорости истечения газов и паров в атмосферу пользуются примерными значениями, вычисленными по формуле

$$v = 4 \sqrt{p_{доп}}, \quad (2)$$

где  $p_{доп}$  — допустимое избыточное давление,  $\text{кгс/м}^2$ .

Формула (2) применима для расчета скорости истечения в диапазоне давления  $\Delta p = 500-3000 \text{ кгс/м}^2$ .

При  $\Delta p = 50-11500 \text{ кгс/м}^2$ ,  $T_{ист} = 300-1000 \text{ К}$ , и нагрузках на ограждающие конструкции  $1,05-1,15 \cdot 10^4 \text{ кгс/м}^2$  скорость истечения, вычисленная по формуле (2), завышена.

### ВРЕМЯ ИСТЕЧЕНИЯ ПРОДУКТОВ ГОРЕНИЯ ЧЕРЕЗ ПРОЕМЫ, ОБРАЗОВАВШИЕСЯ ПРИ ВЗРЫВЕ

Время истечения продуктов взрыва из защищаемого помещения оказывает очень большое влияние на расчет площади ЛСК. Временем истечения продуктов взрыва называется короткий промежуток времени, обычно измеряемый долями секунды, в течение которого необходимо отвести в атмосферу избыточный объем продуктов сгорания в смеси с избыточным воздухом или горючими веществами. При истечении газообразных продуктов через проемы объемный расход должен быть таким, чтобы давление на ограждающие конструкции здания не превысило допустимых нагрузок, а на оболочки технологического оборудования — пределов их прочности. Этот параметр рассчитывают по экспериментальным данным (см. прил. 2) в зависимости от соотношения объемов:

$$\tau_{ист. п} \approx \tau_{ид. з} \sqrt[3]{V_2/V_1},$$

где  $V_1$  — объем экспериментальной установки,  $m^3$ ;  $V_2$  — объем проектируемого помещения,  $m^3$ .

**Пример.** Для пропано-воздушной смеси, по составу близкой к стехиометрической, в объеме  $2 m^3$  ( $V_1$ )  $\tau_{нд.э} = 0,03$  с; определить расчетные значения  $\tau_{ист}$  для  $V_2 = 600 m^3$ ,  $V_2 = 10\,000 m^3$ .

**Решение.**

$$\tau'_{ист} = 0,03 \sqrt[3]{600/2} = 0,2 \text{ с};$$

$$\tau''_{ист} = 0,03 \sqrt[3]{10\,000/2} = 0,238 \text{ с}.$$

Следовательно, в объеме  $10\,000 m^3$  время истечения продуктов взрыва увеличится по сравнению с экспериментальным: в первом случае — в  $0,2 : 0,03 = 6,7$  раза, во втором случае — в  $0,238 : 0,03 \approx 8$  раз.

При отсутствии опытных данных о времени нарастания давления для веществ, у которых интенсивность взрыва менее  $60$  см/с, рекомендуется принимать расчетное значение по табл. 1.

**ТАБЛИЦА 1. РАСЧЕТНОЕ ВРЕМЯ ИСТЕЧЕНИЯ ПРОДУКТОВ ВЗРЫВА В ЗАВИСИМОСТИ ОТ НОРМАЛЬНОЙ СКОРОСТИ ГОРЕНИЯ**

Горючая среда	Нормальная скорость горения, см/с	Время истечения (расчетное), с
Горючие газы	< 60	0,1
Пары легковоспламеняющихся жидкостей	< 45	0,1—0,15
Пары горючих жидкостей	< 45	0,2—0,25
Промышленные пыли (аэрозвеси)	—	0,15—0,5
Аэрозвеси органических соединений и цветных металлов	—	< 0,1

При определении площади ЛСК зданий и сооружений, в которых намечается применение веществ с нормальной скоростью горения более  $60$  см/с (водорода, ацетилена, этилена, окиси этилена, бутадиена и т. д.), аэрозвесей, со скоростями нарастания давления более  $450$  кгс/(см<sup>2</sup>·с) или углеродсодержащих веществ, время истечения продуктов взрыва из защищаемого помещения следует определять расчетом.

В эксплуатационных условиях нормальные скорости горения веществ в трубопроводах, аспирационных воздуховодах, пылесадительных устройствах, сушильных камерах и т. п. увеличиваются вследствие перехода ламинарного горения в турбулентное. Поэтому при про-



ектировании предприятий, в которых будут применяться перечисленные выше горючие вещества, необходимо предусматривать повышенную норму площади ЛСК.

### РАСЧЕТ ДИФФЕРЕНЦИРОВАННОЙ НОРМЫ ПЛОЩАДИ ЛСК

Площадь ЛСК — панелей, фрамуг, клапанов и прочих устройств, в том числе остекленных поверхностей — рассчитывают таким образом, чтобы через образовавшиеся при взрыве проемы обеспечивался выброс в атмосферу газообразных продуктов взрыва с объемным расходом ( $m^3/c$ )

$$Q_c = \Delta V_t \tau_{ист}, \quad (3)$$

где  $\Delta V_t$  — избыточный объем продуктов сгорания,  $m^3$ , при температуре  $T_{ист}$ , °С;  $\tau_{ист}$  — время истечения, с.

Суммарная площадь ЛСК

$$F = Q_c / v, \quad (4)$$

где  $v$  — скорость истечения, м/с.

Следовательно, объемный расход должен удовлетворять неравенству  $F/v \gg \Delta V_t / \tau_{ист}$ .

Удельная расчетная норма площади ЛСК

$$H = F / V_{пом.р}, \quad (5)$$

где  $H$  — расчетная норма площади ЛСК,  $m^2/m^3$ ;  $V_{пом.р}$  — расчетный объем защищаемого помещения,  $m^3$ .

Для надежности расчета рекомендуется принимать следующий расчетный объем помещений:

технологических сооружений (пылесадительных камер, фильтров, бункеров и силосов пылевидной горючей продукции, окрасочных и сушильных камер и т. п.), малогабаритных помещений насосных, компрессорных станций, а также расчетных зон загазованности и расширения продуктов сгорания — полные геометрические объемы;

крупногабаритных помещений (объемом более  $5000 m^3$ ) производств категории А, Е и Б — 80% геометрического (полного) объема.

Формула для расчетной нормы площади ЛСК

$$H = \Delta V_t / \tau_{ист} v V_{пом.р}, \quad (6)$$

где  $v$  — скорость истечения продуктов сгорания, м/с, зависит от температуры истекающих газов



$$v = k \sqrt{T_{\text{ист}}}$$

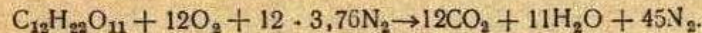
где  $k$  — коэффициент, зависящий от допустимых нагрузок на ограждающие конструкции

$k$	Допустимые нагрузки, кгс/см <sup>2</sup>
6,7 . . . . .	0,15
5,3 . . . . .	0,1
3,9 . . . . .	0,05

### Примеры расчета дифференцированных норм площади ЛСК

На сахарном заводе между производственным корпусом и складом готовой продукции в крытой галерее (4×4 м) смонтирован ленточный транспортер протяженностью 50 м; к галерее прилегают две пристройки для приводных станций объемом 100 м<sup>3</sup> (со стороны склада) и 400 м<sup>3</sup> (со стороны производственного корпуса); суммарный объем этих помещений 1300 м<sup>3</sup>; транспортируется мелкокристаллический продукт с частицами размером примерно 140 мкм, с нижним пределом воспламенения 15 г/м<sup>3</sup>. Молярная масса сахара 342 г/моль. Производство без расчета отнесено по пожарной опасности к категории Б. Определить расчетную норму площади ЛСК.

Решение. Реакция горения сахара



При горении 342 г сахара в нормальных условиях образуется 68 · 22,4 = 1520 л газообразных продуктов (общее число молей продуктов сгорания двуокиси углерода, воды и азота  $\Sigma m = 12 + 11 + 45 = 68$ ). Расчет ведем на 1 м<sup>3</sup> взвеси, содержащей сахара в 5 раз больше нижнего предела воспламенения (75 г/м<sup>3</sup>), т. е. 15,5 = 75 г/м<sup>3</sup>:

$$V_{\text{пр. г}}^0 = 1520 \cdot 75/342 = 380 \text{ л, или } 0,38 \text{ м}^3$$

Если пренебречь объемом сахарной пыли, то избыточный объем воздуха равен

$$V_{\text{изб. в}} = V_{\text{в}} - V_{\text{в.г}}$$

где  $V_{\text{в}}$  — объем воздуха в помещении, м<sup>3</sup>;  $V_{\text{в.г}}$  — объем воздуха, использованного при горении, м<sup>3</sup>.

$$V_{\text{в.г}} = 75 \cdot 57 \cdot 22,4/342 = 280 \text{ л, или } 0,28 \text{ м}^3$$

(57 — число молей воздуха);

$$V_{\text{изб. в}} = 1 - 0,28 = 0,72 \text{ м}^3$$

Суммарный объем газообразных продуктов в помещении  $V_{\text{п}}^0 = (0,72 + 0,38) 1300 = 1430 \text{ м}^3$ . Избыточный объем продуктов сгорания в смеси с воздухом определяем с учетом температуры

истекающей смеси продуктов сгорания с воздухом. Расчетную температуру для заданных условий принимаем 1100 К.

$$V_t = 1430 \cdot 1100/300 = 5240 \text{ м}^3, \Delta V_t = 5240 - 1300 = 3940 \text{ м}^3$$

Скорость истечения в атмосферу продуктов взрыва при

$$p_{\text{доп}} = 0,15 \text{ кгс/см}^2, v = 6,7 \sqrt{T_{\text{ист}}} = 6,7 \sqrt{1300} \approx 240 \text{ м/с}$$

Скорость нарастания давления сахарной пыли достигает 350 кгс/(см<sup>2</sup> · с) при  $\tau_{\text{нд.э}} = 0,02$  с (прил. 2) для заданного объема  $\tau_{\text{ист.р}} \approx \tau_{\text{нд.э}} = 0,02 \sqrt[3]{1300/10} = 0,1$  с. Принимаем для расчета  $\tau_{\text{ист}} = 0,2$  с. Объемный расход истекающих газов определяем по формуле (3)  $Q_c = 3940/0,2 = 19700 \text{ м}^3/\text{с}$ . Площадь ЛСК рассчитываем по формуле (4)  $F = 19700/240 = 82 \text{ м}^2$ .

Норму площади ЛСК вычисляем по формуле (5)  $H = 82/1300 = 0,06 \text{ м}^2/\text{м}^3$ .

Расчетная норма площади ЛСК при загазованности помещения мелкокристаллической сахарной пылью до концентрации 75 г/м<sup>3</sup> превышает нормативную по СНиП II-M-2-72. Общая расчетная площадь 82 м<sup>2</sup> распределяется следующим образом: на облегченные панели для крыши галереи — 40 м<sup>2</sup>, на остекленные поворотные переплеты галереи — 20 м<sup>2</sup>, на защиту ограждающих конструкций двух пристроек — 22 м<sup>2</sup>.

ТАБЛИЦА 2. РАСЧЕТНЫЕ ПЛОЩАДИ ЛСК ДЛЯ МАЛОГАБАРИТНОГО СССР ЖЕЛЕЗА (600 м<sup>3</sup>) ПРИ АВАРИЙНОЙ ПОЛНОЙ ЗАГАЗОВАННОСТИ ПОМЕЩЕНИЯ ВОДОРОДНО-ВОЗДУШНЫМИ СМЕСЯМИ РАЗЛИЧНОГО СОСТАВА

Характеристика смеси	Содержание водорода, г/м <sup>3</sup>	Расчетные и экспериментальные параметры				Расчетные параметры			
		$p_p$ , кгс/см <sup>2</sup>	$T_{\text{ист}}$ , К	$\Delta p/\Delta t$ , кгс/(см <sup>2</sup> · с)	$\tau_{\text{нд}}$ , с	$\Delta V_t$ , м <sup>3</sup>	$p_g$ , м/с	$\tau_{\text{ист.р}}$ , с	норма площади ЛСК (по формуле 6), II, м <sup>2</sup> /м <sup>3</sup>
Бедная	8	2,5	1350*	12,8*	0,25*	2000	180	0,125	0,14
	20	3,3	1600**	340	0,01	2200	210	0,1	0,17
Близкая к стехиометрической	23	4	1700**	700	0,011*	2400	220	0,08	0,22
	Богатая	34	2,5	1200	500*	—	1500	176	0,1
48		2	1000	190	0,03*	1220	170	0,2	0,06

\* Экспериментальные данные.  
\*\* Расчетные данные.

Расчет площади ЛСК для крупногабаритных помещений взрывоопасных производств в условиях локальной загазованности водородно-воздушными смесями:



	Смесь	
	бедная	богатая
Содержание водорода в воздухе, г/м <sup>3</sup>	17	50
Объем, м <sup>3</sup> :		
помещения . . . . .	5000	10000
зоны загазованности . . . . .	1500	1000
зоны расширения продуктов горения	4500	4000
Расчетная температура истечения продуктов взрыва, К . . . . .	1600	1600
Избыточный объем продуктов горения, м <sup>3</sup> . . . . .	5780	3800
Ожидаемое давление в зонах загазованности/расширения, кгс/см <sup>2</sup> . . . . .	3,8/1,26	1,8/0,72
Время нарастания давления (экспериментальное), с . . . . .	0,011	0,03
Скорость истечения продуктов горения, м/с . . . . .	210	210
Расчетное время истечения продуктов горения в заданных объемах, с:		
помещения . . . . .	—	0,2
зоны загазованности . . . . .	0,3	—
зоны расширения продуктов горения	0,4	0,2
Расчетная площадь зон, м <sup>2</sup> /м <sup>3</sup> :		
загазованности . . . . .	0,06	0,02
расширения продуктов горения . . . . .	0,02	—
помещения . . . . .	—	0,01

Поскольку по существующим нормативным требованиям для ЛСК панелей допускается масса 120 кг/м<sup>2</sup>, эти ЛСК обладают значительной инерционностью. Для заблаговременного вскрытия их до подхода ударной волны к ограждающим конструкциям здания, по мнению автора, необходимо ужесточить некоторые нормативные требования:

снизить допустимую массу ЛСК покрытий с 120 до 70 кг/м<sup>2</sup>;

допустимые расчетные нагрузки на элементы ЛСК и их инерционность устанавливать экспериментально на укрупненных установках;

для бесфонарных зданий, оборудованных вентиляционными шахтами для удаления дыма, в зонах, где размещаются взрывоопасные производства, использовать вентиляционные шахты в качестве автоматических сбросных устройств, срабатывающих при избыточном давлении менее 0,01 кгс/см<sup>2</sup>.

Удовлетворяющими современным требованиям могут считаться остекленные (одинарные) поворотные переплеты с боковым шарниром, которые, по опытным данным Московского инженерно-строительного института им. В. В. Куйбышева, при взрыве пропано-воздушной смеси вскрывались за 0,11—0,13 с при общей продолжительности взрыва 0,25 с, т. е. до того, как фронт пламени достигал ограждающих поверхностей опытной камеры.

В США и Великобритании рекомендуются нормы сброса давления при взрыве в зависимости от отношения площади проемов к объему сооружений: для технологических сооружений объемом от 30 до 750 м<sup>3</sup> —  $1/9 - 1/16$  (0,11—0,06 м<sup>2</sup>/м<sup>3</sup>); для помещений и зданий объемом более 750 м<sup>3</sup> —  $1/18 - 1/24$  (0,06—0,04 м<sup>2</sup>/м<sup>3</sup>).

Нормативы 0,04—0,11 м<sup>2</sup>/м<sup>3</sup> совпадают с предложенными расчетными нормами площади ЛСК кроме малогабаритных помещений (объемом до 1000 м<sup>3</sup>), в которых при полной загазованности расчетные нормы могут достигать 0,15 м<sup>2</sup>/м<sup>3</sup>. Однако удельные отношения площадей (от 0,06 до 0,04 м<sup>2</sup>/м<sup>3</sup>) в зданиях объемом более 750 м<sup>3</sup> для всех аэровзвесей по нашему мнению, необоснованны, так как выведены без учета индивидуальных свойств, промышленных металлических пылей, для которых расчетные нормы достигают 0,13—0,15 м<sup>2</sup>/м<sup>3</sup>. При локальной запыленности производственных помещений расчетные нормы площади ЛСК снижаются до 0,03—0,04 м<sup>2</sup>/м<sup>3</sup>.

### УСЛОВИЯ ПРИМЕНЕНИЯ РАСЧЕТНЫХ ДИФФЕРЕНЦИРОВАННЫХ НОРМ ПЛОЩАДИ ЛСК

В предлагаемом варианте классификации (табл. 3 и 4) опасность веществ оценивается как по традиционным показателям, так и по дополнительным критериям потенциальной опасности взрыва, к которым относятся энергетический (тротилловый) эквивалент, скорость нарастания давления, время нарастания давления, энергия зажигания, скорость горения и пределы воспламенения в кислороде.

Предусматривается применение дифференцированных расчетных норм площади ЛСК, которые сопоставляются с нормативными. В расчете учитывается со-

ТАБЛИЦА 3. КЛАССИФИКАЦИЯ ВЗРЫВОПОЖАРООПАСНЫХ ВЗРЫВООПАСНЫХ



СРЕД И РАСЧЕТНЫХ НОРМ ПЛОЩАДИ ЛСК ДЛЯ ЗДАНИЙ ПРОИЗВОДСТВ

Класс опасности, взрывоопасность	Агрегатное состояние, условия применения	Горючее вещество	Допустимое расчетное содержание горючего вещества в аварийных условиях, объемная доля, %	Показатели		взрывоопасности				Норма площади ЛСК, м²/м³					
				пределы воспламенения в воздухе, объемная доля, %		стехиометрический состав газозвушной смеси, объемная доля, %	расчетное время нарастания давления, τ <sub>н.д.</sub> , с	нормальная скорость горения, см/с	минимальная энергия зажигания в воздухе, мДж	Категория производства	по СНиП II-М. 2-72	Расчетная			
				нижний	верхний										
I, слабая	Горючие газы и пары (загазованность более 5% объема помещения до концентрации горючего, близкой к нижнему пределу)	Аммиак	7—15	15	28	21,7	—	23	600	Б	0,03	0,03—0,05			
		Бензол	0,7—1,6	1,4	7	2,7	—	47,8	0,22				А	0,05	0,03—0,05
		Этанол	1,8—4	3,6	19	6,5	—	55,6	—				А	0,05	0,03—0,05
		Ацетон	1,1—3	2,2	13	5	0,3	31,8	—				А	0,05	0,03—0,05
	Промышленные неметаллические пыли (аэрозвеси) с нижним пределом воспламенения 16—65 г/м³	Зерно	Локальная запыленность г/м³	25—60	—	—	—	0,3	—	40	Б	0,03	0,03—0,05		
		Комбикорма		16—50	—	—	—	0,3	—	50					
		Лигнин		30—63	—	—	—	—	—	—					
		Органические красители		65—100	20—50	—	—	0,3	—	—					
		Твердое топливо:		—	—	—	—	—	—	—				—	
		сланцевая руда		50—60	—	—	—	0,3	—	—				—	
II, средняя	Горючие газы под низким давлением и пары (содержание горючего в воздухе менее стехиометрического при τ <sub>н.д.</sub> = 0,2—0,3 с)	Ацетилен*	2,5—5	2,5	81	7,7	0,2	157	0,013	А	0,05	0,06—0,08			
		Водород**	4—9	4	75	29,5	0,25	267	0,017						
		Метан	5—6	5	15	9,5	0,2	37	—						
		Аммиак	16—18	15	28	21,7	0,25	23	680						
	Промышленные неметаллические пыли (аэрозвеси) с пределом воспламенения 2—15 г/м³ при u <sub>взр.</sub> = 50—139 кгс/(см² · с) и τ <sub>н.д.</sub> = 0,2—0,3 с	Сера	Локальная запыленность г/м³	2,3 г/м³	—	—	—	0,2	—	—	Б	0,03	0,06—0,08		
		Руда		14	—	—	—	0,2	—	—					
		Гексаметилентетрамин		65—100	—	—	—	—	—	10					
		Резина		10	—	—	—	—	—	—					
		Стекло органическое		12,6	—	—	—	0,2	—	15					
		—		—	—	—	—	—	—	—				—	

\* Давление до 3 кгс/см².  
\*\* Давление до 10 кгс/см².



Класс опасности, взрывоопасность	Агрегатное состояние, условия применения	Горючее вещество	Показатели			взрывоопасности			Энергетический эквивалент,		Категория производства	Норма площади ЛСК, м²/м³	
			пределы воспламенения в воздухе /кислороде, объемная доля, %		стехиометрический состав смеси воздух/кислород, объемная доля, %	минимальное время нарастания давления, с	нормальная скорость горения, см/с	минимальная энергия зажигания воздух/кислород, мДж	воздух	кислород		СНП П-М. 2-72	расчетная
			нижний	верхний									
III, повышенная	Сжиженные горючие газы, газы и пары под давлением до 10 кгс/см², образующие стехиометрические смеси с воздухом или кислородом, с $u_{взр} = 140-449$ кгс/(см².с) при $\tau_{н.д} \leq 0,1$ с	Ацетилен	2,5/2,5	81/93	7,7/29,5	0,013	157	0,018/0,0003	0,3	1,35	А, Е	0,05	0,09—0,12
		Бензол 2-хлорбутандиен-1,3	1,4/1,4 4,5/4,5	7,1/— 16/54	2,7/11,5 4/16,5	0,06	47,8	0,22/—	0,25 0,26	1,04 1,03	А	0,05	0,09—0,12
							—	—	—	—	—	А	0,05
			Аэров			звеси							
IV, особо взрывоопасная	Неметаллические порошки, органические перекиси: в воздухе $\mathcal{E}_{тнт} = 0,2-0,26$ , в кислороде $\mathcal{E}_{тнт} = 0,5-1,19$  Металлические порошки, в воздухе $\mathcal{E}_{тнт} = 0,3-0,39$ , в кислороде $\mathcal{E}_{тнт} = 0,4-0,49$  Сжиженные горючие газы, криогенные* вещества и горючие жидкости, применяемые в среде окислителей; в воздухе $u_{н} > 60$ см/с; $u_{взр} > 450$ кгс/(см².с); $\tau_{н.д} \leq 0,02$ с;	Перекись дауроила	5—20/—	—	—	—	—	—	0,25	1,1	Б	0,03	0,09—0,12
		Фталевый ангидрид	12,6/—	—	—	0,15	—	15/—	0,24	0,93	Б	0,03	0,09—0,12
		Фенол (пары)	0,3/—	2,4/—	2,6/—	—	—	—	0,25	1,05	Б	0,03	0,09—0,12
		Нафталин (пары)	0,37/—	6,9/—	12,5/—	—	—	—	0,25	1,4	Б	0,03	0,09—0,12
		Ванадий	—	—	—	—	—	—	0,35	—	А, Е	0,05	0,09—0,12
		Водород	4/4	75/90	29,5/67	0,011	267	0,017/0,0003	0,3	1,47	А, Е	0,05	0,13—0,15
		Моносилан	—	—	9,5/33	—	—	—	0,36	1,46	А, Е	0,05	0,13—0,15



Класс опасности, взрывоопасность	Агрегатное состояние, условия применения	Горючее вещество	Показатели взрывоопасности			Энергетический эквивалент		Категория производства	Норма площади ЛСК, м²/м³					
			пределы воспламенения в воздухе/кислороде, объемная доля, %		стехиометрический состав смеси воздух/кислород, объемная доля, %	воздух	кислород		СНиП П-М. 2-72	расчетная				
			нижний	верхний										
IV, особо-взрывоопасная	минимальная энергия зажигания < 15 мДж Неметаллические порошки, в воздухе/кислороде $E_{\text{знт}} > 0,27/1,2$	Циклопентадиен-1,3	—	—	3,1/13,4	—	—	—	0,33	1,42	A, E	0,05	0,13—0,15	
		Фенантрен	5/— (г/м³)	—	—	—	—	—	0,42	1,6	B	0,03	0,13—0,15	
	Дифенил (пары)	0,7/—	5,8/—	1,45/—	0,02	—	—	0,27	1,2					
	Металлические порошки, в воздухе/кислороде $E_{\text{знт}} > 0,5/1$	Бериллий	—	—	—	—	—	—	0,63	2,46	A, E	0,05	0,13—0,15	
		Литий	—	—	—	0,07	—	—	0,63	2,2				
		Алюминий	40/— (г/м³)	—	—	—	—	15/—	0,55	1,8				
		Магний	10/— (г/м³)	—	—	—	0,01	—	120/—	0,57				1,65
		Кальций	—	—	—	—	—	—	0,51	1,24				
Титан	45/— (г/м³)	—	—	—	0,008	—	10/—	0,44	1,3					

\*Хранятся в таре с охлаждением.

держание горючего в смеси с воздухом при аварийной загазованности (запыленности) проектируемого помещения, возможность контакта горючих веществ с окислителями, а также перехода нормального горения в нестационарный режим с самопроизвольным увеличением скорости горения. В связи с этим рекомендуемая методика расчета площади ЛСК ограничена скоростью горения (не более 60 см/с), содержанием горючего вещества, скоростью нарастания давления.

Тритиловые эквиваленты при взрыве горючих веществ в среде окислителей (кислорода) по сравнению с распространением взрыва в воздухе, увеличиваются: для газов, жидкостей и неметаллических порошков — в среднем в 3—4 раза, для металлических порошков — в 2—3 раза (прил. 3).

Наибольшей потенциальной энергией обладают порошки металлов (бериллий, бор, литий, алюминий, магний, кремний, скандий, титан), порошки органических соединений (фенантрен, нафталин), жидкости (циклопентадиен-1,3), газы (ацетилен, водород) и др.

**ДЕЙСТВИЕ ВЗРЫВА  
НА ОГРАЖДАЮЩИЕ КОНСТРУКЦИИ ЗДАНИЙ**

**ЯВЛЕНИЕ ДЕФЛАГРАЦИИ**

При тепловом распространении пламени различают нормальное (медленное) распространение горения, дефлаграцию — последовательное воспламенение горю-



чей смеси по механизму теплопроводности и диффузии — и детонацию — чрезвычайно быстрый экзотермический процесс химического превращения веществ, распространяющийся с постоянной скоростью, превышающей скорость звука. Дефлаграцию рассматривают как форму нестационарного горения, промежуточную между ламинарным и детонационным режимами распространения горения. Увеличение скорости связано с возникновением перед пламенем ударной волны, поджигающей газ ударным сжатием (с повышением давления). К дефлаграции также относят равномерное турбулентное распространение пламени с передачей тепла от слоя к слою теплопроводностью и диффузией и передвижение медленного горения с бегущей перед фронтом пламени ударной волной.

Увеличение скорости пламени часто вызывается турбулентным движением газа на стенках жесткой оболочки, способной отражать слабые ударные волны. Даже в отсутствие турбулентного режима горение может ускоряться при зажигании в центре большого объема покоящегося газа. Это явление объясняется потерей устойчивости нормального фронта пламени даже при весьма малых возмущениях. Впервые неустойчивость нормального пламени наблюдали в Институте химической физики АН СССР. К нестационарным режимам горения, вызванным увеличением скорости распространения пламени, относится горение спиртокислородной смеси; при повышении скорости пламени перед фронтом горения до 41,2 м/с давление в ударной волне превышает начальное в 2 раза. Увеличение скорости горения в 2 раза увеличивает образование ударной волны с давлением в 8 раз больше начального.

В производственных условиях турбулентные воздушные потоки образуются в запыленных транспортных каналах, размольных механизмах, вентиляционных каналах, циклонах, а также в реакторах с мешалками и т.п. При турбулентном горении определяющим параметром опасности является не нормальная скорость горения, а значительно более высокие скорости распространения, обеспечивающие повышенные скорости нарастания давления.

Известно, что во время взрывов промышленных пылей (в том числе зерновых, пищевых и др.) при распространении пламени по запыленным каналам —

транспортным галереям, аспирационным воздуховодам, трубам пневмотранспорта, нориям и т.п. — протяженностью 50 м и более образуется ударная волна, близкая по параметрам к ударной волне некоторых детонирующих газовых смесей. По данным Института химической физики АН СССР и Института физики земли АН СССР, анализ повреждений остекления и строительных конструкций при аварийных взрывах больших объемов газоздушных смесей показывает, что образующаяся в воздухе ударная волна соответствует детонации этих смесей или режимам нестационарного горения, близким к детонации [1].

При взрыве некоторых горючих газов и жидкостей в среде окислителей не удается понизить создающееся избыточное давление до допустимых нагрузок на ограждающие конструкции (0,05—0,15 кгс/см<sup>2</sup>) только увеличением расчетной площади ЛСК до практически возможных пределов. В этих случаях ограждающие конструкции делают более прочными и устойчивыми, чем легкобрасываемые ослабленные элементы, в том числе и с застекленными проемами. Эти конструкции рассчитывают на ударный импульс взрывной волны по особой методике.

### ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТЬ ДЕЙСТВИЯ УДАРНОЙ ВОЛНЫ НА СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ

Время действия ударной волны  $\tau_+$  (рис. 5) измеряется временем между двумя моментами прохождения переднего фронта ударной волны  $aa'$  и  $bb'$ , где избыточное давление  $\Delta p$  равно нулю. Для расчета времени действия ударной волны при взрыве в воздухе взрывчатого вещества (ВВ) нормальной мощности (например, тротила) в Институте химической физики АН СССР М. А. Садовским впервые была предложена формула

$$\tau_+ = a \sqrt{r} \sqrt[6]{m},$$

где  $r$  — расстояние от места взрыва, м;  $m$  — масса заряда, кг;  $a$  — коэффициент, равный 0,0013—0,0017. В опытах время действия положительного давления  $\tau_+$  на преграду при взрывах зарядов ВВ составляло от 1,6 до 5,6 мс, при взрывах газов под давлением — от 1,1 до 1,3 мс.

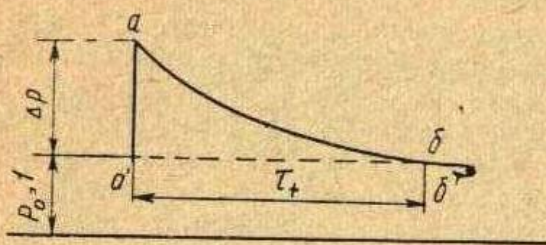
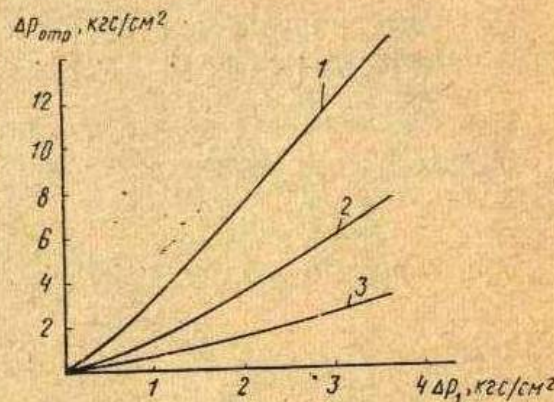


Рис. 5. Зависимость времени действия ударной волны на преграду от давления



Рис. 7. Зависимость измеренных давлений на преграду от начального давления

1 — отраженная волна; 2 — установившийся режим обтекания преграды; 3 — скоростной напор



ние ударной волны на строительные конструкции при взрывах газо- и пылевоздушных смесей, при обтекании преграды и начальном давлении  $p_1 < 3,5$  кгс/см<sup>2</sup> и учитывая энергетический (тротильный) эквивалент веществ (прил. 3).

При отраженной ударной волне и установившемся режиме обтекания преграды ударной волной (рис. 7), если избыточное давление меньше 3,5 кгс/см<sup>2</sup> отношение  $\Delta p_{обт} / \Delta p_{отр}$  примерно равно 0,5. При большем давлении на фронте ударной волны возникают сверхзвуковые течения газов, в результате чего около преграды формируется уплотнение.

Максимальное давление ударной волны при взрыве газа массой, эквивалентной заряду типового взрывчатого вещества, на заданном расстоянии до преграды, приближенно определяют по формуле М. А. Садовского

$$p_{\max} = 4,2 \sqrt[3]{m/r} \quad (8)$$

где  $m$  — масса заряда, кг;  $r$  — расстояние от центра взрыва, м.

Эта формула хорошо согласуется для  $\sqrt[3]{m/r} < 0,1$ . Давление в отраженной волне для двухатомных газов ( $k=7,5$ ) в зависимости от давления падающей ударной волны определяется по формуле

$$p_2 \approx \frac{3k-1}{k-1} p_1$$

где  $p_1$  — давление падающей ударной волны;  $k = c_p / c_v$  обычно равно 1,4.

Для слабых волн давление в отраженной волне в 2 раза больше, чем в падающей волне.

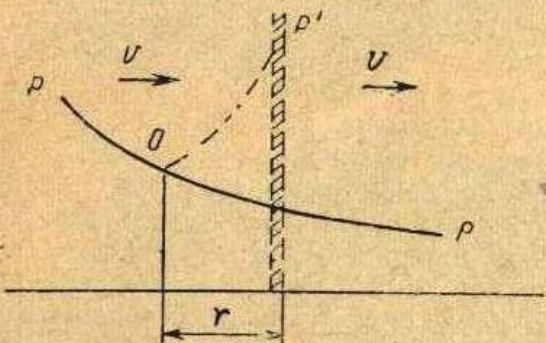


Рис. 6. Кривая уплотнения воздуха у преграды и возрастания давления ударной волны

$r$  — расстояние от преграды, м

При встрече ударной волны с преградой создается уплотнение воздуха и давление изменяется (рис. 6) по кривой  $PO\rho$  с минимумом в точке  $o$ , отстоящей от преграды на расстоянии  $r = \tau_+ c$  ( $c$  — скорость звука). Опытным путем определяют положение точки  $o$  и измеряют давление по пути распространения ударной волны.

Эффективность обтекания ударной волной преграды зависит от ее размеров. Если время обтекания велико, ударная волна останавливается (ее энергия поглощается преградой), оказывая на преграду максимальное давление. При малом времени обтекания волна полностью обтекает преграду.

Давление обтекания преград было впервые определено в Институте химической физики АН СССР. Для воздуха его вычисляют по формуле

$$p_2 = p_1 \left( 1 + \frac{(p_1 - 1)^2}{1,4 p_1 (p_1 + 6)} \right)^{3,5} \quad (7)$$

где  $p_2$  — давление обтекания преграды, кгс/см<sup>2</sup>;  $p_1$  — начальное давление среды, кгс/см<sup>2</sup>.

Формула (7) справедлива для  $p_1 < 3,5$  кгс/см<sup>2</sup>. Избыточное давление обтекания ( $p_2 - 1$ ) приблизительно равно  $p_{\max} / 2$ .

По формуле (7) можно также рассчитывать давле-

Удельный импульс при сферической форме заряда ВВ нормальной мощности

$$I = \frac{1}{2} P_{\text{макс}} \tau_+$$

где  $I$  — удельный импульс, кгс/(м<sup>2</sup>·с);  $P_{\text{макс}}$  — максимальное избыточное давление, кгс/м<sup>2</sup>;  $\tau_+$  — время действия давления (длительность фазы сжатия), с или мс.

При взрыве в воздухе приближенно можно считать

$$I = 60m^{2/3}/r,$$

где  $m$  — масса заряда ВВ, кг;  $r$  — расстояние от центра взрыва до преграды, м.

Эта формула справедлива для

$$r > 0,6 \sqrt[3]{m}.$$

Разрушение строительных конструкций при взрыве пыле- и газозвудушных смесей зависит от продолжительности действия избыточного давления. Чем меньше время действия ударной волны, тем меньше разрушающий эффект. Кроме того, он зависит от периода собственных колебаний строительной конструкции (табл. 5), который может быть определен по формуле

$$P = 2\pi\sqrt{mf_0},$$

ТАБЛИЦА 5. ПЕРИОДЫ СОБСТВЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ НЕКОТОРЫХ ТИПОВЫХ ЭЛЕМЕНТОВ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ И РАЗРУШАЮЩИЕ НАГРУЗКИ

Элемент строительной конструкции	Период собственных колебаний $P$ , с	Разрушающая нагрузка	
		статистическая, $F$ , кгс/см <sup>2</sup>	импульсная, $I$ , кгс·с/м <sup>2</sup>
Кирпичная стена:			
в 2 кирпича	0,01	0,45*	220*
" 1,5 "	0,015	0,25	190
Железобетонная стена 0,25 м	0,015	3	—
Застекление	0,02—0,04	0,05—0,1	—
Перегородки легкие	0,07	0,05	—
Перекрытия по деревянным балкам	0,3	0,1—0,16	—

\*Время действия импульсной нагрузки  $\tau_+ = //P$ .



где  $P$  — период собственных колебаний конструкции, с;  $m$  — масса конструкции, деленная на ускорение силы тяжести, кг·с<sup>2</sup>/м;  $f_0$  — прогиб конструкции, м.

Продолжительность действия ударной волны как правило, меньше периода собственных колебаний большинства строительных и инженерных сооружений. Следовательно, величина деформации зависит не от давления, а от импульсной нагрузки. На практике рекомендуется для расчетов использовать импульсные нагрузки при  $\tau_+ \leq 0,25 P$ . В химической промышленности рассчитывают конструкции на:

удельный импульс  $\tau_+ \leq 1/4 P$ ;

максимальное давление  $\tau_+ > 1/4 P$ ;

воздействие мгновенного импульса  $\tau_+ < 1/10 P$ ;

действие кратковременной нагрузки  $\tau_+ < 1/3 P$ ;

действие статических нагрузок  $\tau_+ = 5-10 P$ .

**Пример.** В одноэтажном кирпичном здании объемом 4300 м<sup>3</sup> (40×18×6 м) при сварке и резке металлов с использованием ацетилена загазована металлическая будка объемом 30 м<sup>3</sup> (3×3×3,5), расположенная в центре помещения; в течение короткого промежутка времени в будке образовалась смесь ацетилена с воздухом, близкая по составу к стехиометрической, и произошел взрыв. Производство по пожарной опасности без расчета было отнесено к категории Г.

Требуется оценить устойчивость строительных конструкций здания, учитывая что в ограждающих конструкциях не были предусмотрены проемы.

**Исходные данные.** При заданном составе ацетилено-воздушной смеси максимальная скорость нарастания давления  $U_{\text{взр}} = \Delta p / \Delta t = 585$  кгс/(см<sup>2</sup>·с),  $\tau_{\text{н.д.}} = 0,017$  с (в объеме 10 м<sup>3</sup>); увеличение давления  $p/p_0 \approx 9$ . Температура горения  $T_r = 2400$  К. Скорость распространения при ламинарном горении  $u_{\text{л}} = 160$  см/с; в условиях нестационарного режима  $D = 1400$  м/с. Энергетический (тротильный) эквивалент в воздухе  $\mathcal{E}_{\text{тнт}} = 0,3$  (1 кг смеси исходных продуктов реакции эквивалентен 0,3 кг тринитротолуола).

**Решение.**

**Первая стадия.** Определение объема продуктов горения и максимального давления. Реакция горения ацетилена в воздухе  $C_2H_2 + 2,5O_2 + 2,5 \cdot 3,76N_2 \rightarrow 2CO_2 + H_2O + 9,4N_2$ .

Из одной молярной массы ацетилена (26 кг/моль) образуется продуктов горения  $V_{\text{пр.г}}^0 = 12,4 \cdot 22,4 \approx 280$  л.

В стехиометрической ацетилено-воздушной смеси содержится 97,5 г/м<sup>3</sup> ацетилена. При сгорании 1 м<sup>3</sup> смеси образуется продуктов  $V_{\text{пр.г}}^0 = 97,5 \cdot 280 / 26 \text{ г} \approx 1050$  л, или 1,05 м<sup>3</sup>. При заданной температуре  $T_r = 2400$  К в помещении объемом 30 м<sup>3</sup> образуется продуктов сгорания  $V_{\text{пр.г}} = 1,05 \cdot 30 \cdot 2400 / 273 \approx 2780$  м<sup>3</sup>. Избыточный объем продуктов горения  $\Delta V_r = 2780 - 30 = 2750$  м<sup>3</sup>. Ожидаемое избыточное давление  $\Delta p_{30} = 2750 / 30 = 9,2$  кгс/см<sup>2</sup>, т. е. близко к заданному.



Заряд газовой смеси в объеме 30 м<sup>3</sup> эквивалентен шаровому заряду с радиусом 1,9 м. Средневзвешенная плотность ацетилено-воздушной смеси  $d_{ср} = (1,29 \cdot 0,9 + 1,18 \cdot 0,1) / 1 = 1,28 \text{ кг/м}^3$ , где 1,29 — плотность воздуха, кг/м<sup>3</sup>; 1,18 — плотность ацетилена, кг/м<sup>3</sup>.

Масса газового заряда  $m = 30 \cdot 1,28 = 38 \text{ кг}$  эквивалентна заряду ВВ 38 · 0,3 = 11,4 кг ТНТ.

Максимальные нагрузки на стены и покрытие, отстоящие на  $r=1$  от центра взрыва, рассчитывают с учетом эквивалентного газозвукового заряда по формуле (8)

$$P_{\text{макс}} = 4,2 \sqrt[3]{m_{\text{ТНТ}}} / r = 4,2 \sqrt[3]{11,4} / 1 = 9,5 / 1.$$

Определяем максимальную нагрузку и время пробега ударной волны на следующие конструкции, расположенные на разных расстояниях от места взрыва:

- торцовые стены  $l_1 = 20 \text{ м}$ ,  $P'_{\text{макс}} = 9,5 / 20 = 0,47 \text{ кгс/см}^2$ ;  $\tau_1 = 20 / 1400 = 0,014 \text{ с}$ ;
- продольные стены  $l_2 = 9 \text{ м}$ ,  $P'_{\text{макс}} = 9,5 / 9 = 1,05 \text{ кгс/см}^2$ ;  $\tau_2 = 9 / 1400 = 0,006 \text{ с}$ ;
- покрытия  $l_3 = 3 \text{ м}$ ,  $P'_{\text{макс}} = 9,5 / 3 = 3,1 \text{ кгс/см}^2$ ;  $\tau_3 = 3 / 1400 = 0,002 \text{ с}$ .

Из анализа расчетных давлений на элементы сооружения видно, что не защищенное ЛСК кирпичное здание может быть разрушено следующим образом: в первую очередь покрытие (даже железобетонное), затем продольные стены (в центральной части наиболее расположенные к будке) и торцовые стены.

Рассчитанные по формуле (8) максимальные нагрузки на ограждающие конструкции ориентировочные, так как при данной массе заряда и малых  $r$  значение  $\sqrt[3]{m/r} = 0,11$ , т. е. предельное значение. При заданных условиях взрыва в помещении большего объема  $100 \times 18 \times 6 = 11\,000 \text{ м}^3$  для торцовых стен ( $r=50 \text{ м}$ ),  $P_{\text{макс}} = 9,5 / 50 = 0,2 \text{ кгс/см}^2$ , время пробега ударной волны  $\tau = 0,04 \text{ с}$ ;  $\sqrt[3]{m/r} = 2,25 / 50 = 0,05$ .

**Вторая стадия расчета.** Проверяем возможность защиты здания расчетными нормами площади ЛСК для загазованности помещения. Температуру истекающей газовой смеси принимаем  $T_r = 2400 \text{ К}$ ; скорость истечения в атмосферу при  $P_{\text{доп}} = 0,05 \text{ кгс/см}^2$ , т. е.  $p = 1,05 \cdot 10^4 \text{ кгс/м}^2$ , по формуле (2)  $v = 3,9 \sqrt{2400} = 190 \text{ м/с}$ . Выделим из общего объема помещения (в центральной части) взрывоопасную зону объемом 2200 м<sup>3</sup>. В этой зоне расчетное время истечения продуктов горения

$$\tau_{\text{ист.р}} = \tau_{\text{нд.э}} = 0,017 \sqrt[3]{30} \approx 0,05 \text{ с}.$$

Ожидаемое давление при расширении продуктов взрыва для полного объема помещения  $\Delta p_{\text{ном}} = 2750 / 4300 = 0,64 \text{ кгс/см}^2$ , а для выделенной зоны  $\Delta p_{3,0} = 2750 / 2200 \approx 1,25 \text{ кгс/см}^2$ .

Расчетная норма площади ЛСК для выделенной зоны  $N_{3,0} = 2750 / (0,05 \cdot 190 \cdot 2200) \approx 0,13 \text{ м}^2/\text{м}^3$ . При расчетной норме площади ЛСК  $F_{3,0} = 2200 \cdot 0,13 \approx 290 \text{ м}^2$  следует полностью отнести на защиту покрытия. Кроме того, для защиты сооружения в целом определим расчетную норму площади ЛСК при  $\tau_{\text{ист.р}} = \tau_{\text{нд.э}} = 0,017 \sqrt[3]{4300/10} \approx 0,017 \cdot 5,2 \approx 0,1 \text{ с}$

$$N_{\text{ном}} = 2750 / (0,1 \cdot 190 \cdot 430) = 0,64 \text{ м}^2/\text{м}^3.$$

Для надежности примем норму (без расчета)  $0,05 \text{ м}^2/\text{м}^3$ , при которой суммарная ЛСК  $F_{\text{ном}} = 4300 \cdot 0,05 = 215 \text{ м}^2$ . Эту площадь распределим следующим образом: на остекленные поворотные переплеты по продольным стенам — 100 м<sup>2</sup>, на торцовые стены — 45 м<sup>2</sup> на покрытие — 70 м<sup>2</sup>. Следовательно, для отдельно стоящих одноэтажных зданий с газозвуковыми средами, горение которых переходит в нестационарный режим (особо опасные среды IV класса, см. табл. 5), можно применять повышенные дифференцированные нормы площади ЛСК в пределах 0,13—0,15 м<sup>2</sup>/м<sup>3</sup>.

В примере из общей площади поверхности ограждающих конструкций, стен и покрытия 1620 м<sup>2</sup> на площадь ЛСК отведено 500 м<sup>2</sup>, т. е. около 30%, что практически осуществимо.

### МЕТОДИКА РАСЧЕТА ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО (ТРОТИЛОВОГО) ЭКВИВАЛЕНТА

В качестве дополнительного критерия оценки взрывоопасности различных горючих веществ и при определении дифференцированных норм площади ЛСК рекомендуется использовать энергетический (тротиловый) эквивалент. Этот показатель потенциальной энергии взрыва можно применить и при оценке действия ударной волны на элементы строительных конструкций, как на преграду. Энергетический эквивалент равен удельной теплоте взрыва горючего вещества в воздухе, приходящейся на 1 кг реагентов, отнесенной к потенциальной энергии типового взрывчатого вещества — тротила (тринитротолуола, ТНТ), для которого эта энергия равна 1000 ккал/кг (4186 кДж/кг).

Пример. Вычислим энергетический эквивалент для сжиженного газа пропана с молярной массой 44 кг/моль и теплотой сгорания 12 028 ккал/кг. Реакция горения пропана в воздухе



где  $Q_p$  — молярный тепловой эффект химической реакции  $Q_p = 12\,028 \cdot 44 = 529\,232 \text{ ккал/моль}$ .

Количество (сумма) реагентов

$$\Sigma_{\text{исх}} = 1 \cdot 44 + 5 \cdot 32 + 19 \cdot 28 = 734 \text{ кг}.$$

Удельная теплота взрыва пропана в воздухе  $Q_{C_3H_8} = 529\,232 / 734 = 720 \text{ ккал/кг смеси}$ .





Горючая смесь	Стехиометрический состав смеси с воздухом и кислородом, объемная доля, %	Нормальная скорость горения смеси с воздухом и кислородом, см/с	Содержание горючего в смеси с воздухом и кислородом, объемная доля, %	Нормальная скорость горения бедных и богатых смесей, см/с	Содержание горючего в смеси с воздухом и кислородом, объемная доля, %
Водород—воздух	—	—	—	200	20
То же	—	—	—	380	40
Водород—кислород+5% азота	67	870	70	150	60
Водород—кислород	65	1590	65	55	70
Гексан—воздух	2,2	32	2,5	28	2
Гексан—кислород	9,5	240	8	20	2
Гептан—воздух	1,9	38,6	—	—	—
Диэтиловый эфир—воздух	3,4	37,5	4,5	30	4
o-Ксилол—воздух	1,2	34,4	—	—	—
Метан—воздух	9,5	37	10,5	25	7
То же	—	33	9,5	10,5	6
Метан—кислород	33	450	—	5,1	5,6
Метанол—воздух	12,4	57,2	15	338	27
изо-Октан—воздух	1,7	34,6	—	—	—
Пентадиен-1,2—воздух	3	51,8	—	—	—
n-Пентан—воздух	2,6	35	2,9	30	2,3
изо-Пентан—воздух	2,6	36,6	—	—	—
Пропан—воздух	4,1	45,5	5	—	—
То же	—	—	—	30	2
Пропилен—воздух	4,5	43,5	4,8	31	2,8
изо-Пропанол—воздух	4,6	41,5	—	36	3,2
Сероводород—воздух	11,7	39	—	40	4
Сероуглерод—воздух	6,6	48,5	8,2	40	6
То же	—	—	—	48	7,6
Тетралин—воздух	1,65	36,5	—	40	11,3
Толуол—воздух	2,3	38,5	4	—	—
Углерода окись—воздух	29,5	41,5	53	20	22
Углерода окись—кислород	66,3	63	66,5	60	40
Циклогексан—воздух	2,3	35	2,5	27	1,8
Циклопентан—воздух	2,7	37,3	3,16	—	—
Циклопропан—воздух	4,7	47,5	3	—	—
Этан—воздух	5,7	40,1	7	—	—
Этанол—воздух	6,5	55,6	12	—	—
Этилен—воздух	6,5	63	7	58	6
То же	6,5	—	—	40	5
Этилена окись—воздух	7,7	89,5	11,5	—	—

ХАРАКТЕРИСТИКИ ВЗРЫВООПАСНОСТИ ГАЗО- И ПАРОВОЗДУШНЫХ СМЕСЕЙ И АЭРОВЗВЕСЕЙ  
Газо- и паровоздушные смеси

Горючая смесь	Скорость нарастания давления кгс/(см <sup>2</sup> .с)	Содержание горючего, объемная доля, %	Время нарастания давления, с	Давление взрыва, кгс/см <sup>2</sup>	Расчетное время истечения продуктов сгорания, с, для объема помещения, м <sup>3</sup>		Удельная теплота сгорания, ккал/кг
					до 1000	1000—5000	
Аммиак—воздух	—	—	—	—	0,15	0,3	4450
Ацетилен—воздух	585	13	0,017	10,8	0,08	0,2	11 500
То же	500	35	—	10,5	—	—	—
Ацетон—воздух	82	6	0,07	5,9	0,2	0,3	6800
Бензол—воздух	107	3	0,06	6,9	0,15	0,2	9200
Бензин—воздух	106	2,5	0,06	6,4	0,15	0,2	11 200
Бутадиен (дивинил)—воздух	—	—	—	—	0,08	0,2	10 500
Бутан—воздух	116	5	0,06	6,9	0,15	0,2	11 839
Водород—воздух	700	35	0,01	7,2	0,08	0,2	28 670
То же	500	42	—	—	0,1	0,2	—
Гексан—воздух	190	60	0,03	5,7	0,15	0,3	—
Дау терм (смесь дифенила и дифенилоксида)—воздух	113	10	0,25	3,2	0,2	0,3	—
Гексан—воздух	103	2,5	0,06	6,5	0,08	0,2	11 496
Дау терм (смесь дифенила и дифенилоксида)—воздух	60	—	0,04	4	0,25	0,4	—
Дихлорэтилен=1,2—воздух	37	10	0,18	6,7	0,3	0,4	2370
Диэтиловый эфир—воздух	140	5,2	0,05	7,9	0,2	0,3	8100
Изопропанол—воздух	91	6	0,06	6,8	0,2	0,3	7200
Изопропиловый эфир—воздух	116	3	0,07	7,6	0,15	0,2	—
Метан—воздух	50	10	0,11	5,5	0,2	0,3	11 900
То же	25	7	—	—	0,2	0,25	—
Метанол—воздух	103	15	0,06	6,5	0,15	0,3	7500
Пропан—воздух	250	6	0,03	7,4	0,15	0,25	11 100
То же	50	4	0,15	—	0,2	0,3	—
Пропилен—воздух	—	—	—	—	0,15	0,3	10 900
Толуол—воздух	65	4	0,1	6,7	0,2	0,3	10 200
Углерода окись—воздух	50	30	—	4,8	0,15	0,2	2460
Формальдегид—воздух	180	23	0,04	6,3	0,15	0,2	4100
Циклогексан—воздух	140	3	0,05	7,9	0,2	0,3	11 150
Этан—воздух	145	7	0,05	7,2	0,15	0,2	12 400
Этанол—воздух	150	10	0,05	7	0,15	0,2	7400
То же	106	12	0,07	6,7	0,2	0,3	—
Этилен—воздух	50	5	—	—	0,3	0,4	—
Этилен—воздух	448	8	0,02	8,5	0,08	0,2	11 250
Этилена окись—воздух	—	—	—	9,9	0,1	0,2	6237



**Аэрозвеси неметаллов**

Аэрозвесь	Максимальное давление взрыва, кгс/см <sup>2</sup>	Максимальная скорость нарастания давления, кгс/(см <sup>2</sup> ·с)	Минимальное время нарастания давления, с	Расчетное время истечения продуктов сгорания, с, в помещении объемом, м <sup>3</sup>	
				до 1000	1000—5000
Адипиновая кислота	5,3	193	0,027	0,2	0,3
Аллиловый спирт	4,9	258	0,019	0,15	0,3
α-Ацетилсалициловая кислота (аспирин)	6	700	0,008	0,07	0,2
Ацетат бериллия	6,3	158	0,04	0,25	0,3
Ацетилцеллюлоза	4,3	98	0,044	0,25	0,3
Бензоат натрия	6	700	0,008	0,07	0,2
Гидрооксипропилцеллюлоза	6,9	210	0,033	0,2	0,3
Глюкоза	5	17	0,3	0,5	0,6
Декстрин	5,9	430	0,014	0,15	0,3
Диаллилфталат	4,9	610	0,008	0,07	0,2
Динитробензойная кислота	6,7	310	0,022	0,2	0,3
Динитробензамид	6,7	465	0,014	0,15	0,2
Динитроортокрезол	3,9	158	0,024	0,2	0,3
Дифенил	7,7	385	0,02	0,2	0,3
Древесная мука	7,7	385	0,02	0,2	0,3
Канифоль	4	218	0,018	0,15	0,3
Крахмал кукурузный	5,2	155	0,034	0,2	0,3
dL-Метионин	5,5	410	0,013	0,15	0,3
Мыльный порошок	4,3	94	0,046	0,25	0,3
m-Нитробензойная кислота	4,9	208	0,024	0,2	0,3
o-Нитропиридин	5,6	> 720	0,008	0,07	0,2
n-Оксибензальдегид	4,2	230	0,018	0,15	0,3
Полиэтилен	5,9	90	0,065	0,4	0,6
Пентасульфид фосфора	3,9	> 720	0,005	0,05	0,2
Полиэтилентерефталат	6,3	525	0,012	0,15	0,3
Пробковая пыль	6,9	470	0,015	0,15	0,3
Рис	3,9	158	0,023	0,2	0,3
o-Салициланилид	4,4	320	0,014	0,15	0,3
Сахароза (дисахарид)	6,3	350	0,018	0,15	0,3
Сера	5,6	350	0,016	0,15	0,3
Стеарат алюминия	5,8	> 720	0,008	0,07	0,2
Стеарат кальция	6,8	690	0,01	0,1	0,2
Стеарат цинка	4,9	> 720	0,007	0,06	0,2
Тринитротолуол	4,6	150	0,03	0,2	0,3
Триоксан	6,2	430	0,014	0,15	0,3

Аэрозвесь	Максимальное давление взрыва, кгс/см <sup>2</sup>	Максимальная скорость нарастания давления, кгс/(см <sup>2</sup> ·с)	Минимальное время нарастания давления, с	Расчетное время истечения продуктов сгорания, с, в помещении объемом, м <sup>3</sup>	
				до 1000	1000—5000
Угольная пыль	3,4	58	0,06	0,25— —0,3	0,4
Фенольная смола	5,6	420	0,013	0,15	0,3
Фталевый ангидрид	4,9	297	0,022	0,15	0,3
Фталимид	5,7	325	0,018	0,15	0,3
Целлюлоза, хлопья	6,6	208	0,031	0,2	0,3
Шеллак	5,3	245	0,022	0,2	0,3
Эбонит (сырой)	4,1	244	0,017	0,15	0,3
Fe-Диметилдитиокарбамат	5,8	450	0,012	0,15	0,3
Нафтил-N-метилкарбамат	4,6	360	0,013	0,15	0,3

**Аэрозвеси металлов**

Аэрозвесь	Нижний предел воспламенения аэрозоля, г/м <sup>3</sup>	Максимальная скорость нарастания давления, кгс/(см <sup>2</sup> ·с)	Минимальное время нарастания давления, с	Максимальное давление взрыва, кгс/см <sup>2</sup>	Расчетное время истечения продуктов сгорания, с, в помещении объемом, м <sup>3</sup>	
					до 1000	1000—5000
Алюминий:						
размер частиц 800 мкм	40	410	0,016	6,4	0,15	0,3
тонкого помола	25	700	0,009	6,3	0,08	0,2
Бор 85% + магний 8%	135	175	0,036	6,3	0,25	0,3
Ванадий	220	21	0,12	2,5	0,4	0,6
Железа карбонил	105	490	0,007	3,5	0,06	0,2
Кремний	80	700	0,01	7,4	0,15	0,3
Магний толченый	40	345	0,015	5,2	0,15	0,2
Марганец	125	193	0,018	3,5	0,15	0,3
Олово	190	88	0,03	2,5	0,25	0,3



Аэровзвесь	Нижний предел воспламенения аэрозвеси, г/м <sup>3</sup>	Максимальная скорость нарастания давления, кгс/см <sup>2</sup> ·с	Минимальное время нарастания давления, с	Максимальное давление взрыва, кгс/см <sup>2</sup>	Расчетное время истечения продуктов сгорания в помещении объемом, м <sup>3</sup>	
					до 1000	1000—5000
Сплав алюминия с магнием (1:1)	50	700	0,009	6,3	0,08	0,2
Сплав кальция с кремнием	600	700	0,008	5,3	0,07	0,2
Титан	45	700	0,008	5,6	0,07	0,2
Титана гидрид	70	700	0,01	6,7	0,15	0,3
Торий	75	230	0,015	3,5	0,15	0,3
Тория гидрид	80	473	0,009	4,2	0,08	0,2
Уран	45	245	0,016	3,9	0,15	0,3
Урана гидрид	60	438	0,007	3,2	0,06	0,2
Ферромарганец	130	298	0,01	3,2	0,15	0,3
Ферротитан	140	665	0,006	3,9	0,05	0,2
Цинк	480	123	0,03	3,5	0,25	0,3
Цирконий	40	612	0,008	4,6	0,07	0,2
Цирконий	—	360	0,01	3,6	0,15	0,3
Циркония гидрид	40	613	0,008	4,6	0,07	0,2

Примечание: расчетные значения  $\tau_{ист}$  даны по экспериментальным данным  $\tau_{нд}$  с учетом зависимости времени нарастания давления  $\tau_{нд}$  от объема помещения.

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ (ТРОТИЛОВЫЕ) ЭКВИВАЛЕНТЫ ГОРЮЧИХ ВЕЩЕСТВ ПРИ ВЗРЫВЕ В ВОЗДУХЕ И КИСЛОРОДЕ

Газы, жидкости и твердые вещества [неметаллические порошки]

Горючее вещество	Формула (общая)	Молярная масса	Удельная теплота сгорания, ккал/кг	Молярный тепловой эффект химической реакции сгорания, 10 <sup>4</sup> ккал/моль	Сумма исходных веществ, кг, воздух/кислород	Энергетический (тротило-вый) эквивалент	
						воздух	кислород
Абиетиновая кислота	C <sub>20</sub> H <sub>30</sub> O <sub>2</sub>	302	9150*	2763*	3970/1150	0,25	1,1
Бутандикарбоновая (адипиновая) кислота	C <sub>6</sub> H <sub>10</sub> O <sub>4</sub>	146	4570	668,6*	1039/354	0,25	0,87
Акрилонитрил	C <sub>3</sub> H <sub>3</sub> N	53	7600	403	738/213	0,2	0,87
7-Аминогептановая (аминоэнантовая) кислота	C <sub>7</sub> H <sub>15</sub> NO <sub>2</sub>	145	7100*	1030*	1553/473	0,24	1,05
Аммиак	NH <sub>3</sub>	17	4450	75,7	120/41	0,23	0,83
Аммония нитрат (аммиачная селитра)	N <sub>2</sub> H <sub>4</sub> O <sub>9</sub>	80	6570*	527*	286/128	0,66	1,87
Анилин	C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> NH <sub>2</sub>	93	8620*	815	1221/355	0,24	1,05
Ацетилсалициловая кислота (аспирин)	C <sub>9</sub> H <sub>8</sub> O <sub>4</sub>	180	5160*	930	1359/414	0,25	1,04
Ацетальдегид	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> O	44	6320	278,4	384/124	0,26	1,04
Ацетилен	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	26	12000	312	370/105	0,3	1,35
Ацетон	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> O	58	6800	395	606/186	0,23	1,04
Ацетофенон	C <sub>8</sub> H <sub>8</sub> O	120	8760*	1051*	1556/456	0,24	1,07
Бензины легкие	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	70	11200	780	1166/326	0,24	1,1
Бензойная кислота	C <sub>7</sub> H <sub>6</sub> O <sub>2</sub>	122	6324	765	1152/362	0,24	0,97
Бензол	C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	78	9200	720	1103/318	0,25	1,04
Бутадиен-1,3 (дивинил)	C <sub>4</sub> H <sub>6</sub>	54	10500	567	810/225	0,25	1,15
Бутадион	C <sub>15</sub> H <sub>20</sub> O <sub>2</sub> N <sub>2</sub>	308	8620*	2608*	3464/1044	0,27	1,14
Бутилены	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub>	56	11150*	647	892/248	0,26	1,28
Винилхлорид	C <sub>2</sub> H <sub>3</sub> Cl	63	4490*	282*	475/151	0,21	0,85
Водород	H <sub>2</sub>	2	28900	57,8	71/18	0,29	1,47
Гексан	C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>	86	10700	920	1390/390	0,24	1,1
Гидразин	N <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	32	3500	112	443/128	0,1	0,41
Диоксibenзол (гидрохинон)	C <sub>6</sub> H <sub>6</sub> O <sub>2</sub>	110	6170*	679*	1071/334	0,24	0,97



Горючее вещество	Формула (общая)	Молярная масса	Удельная теплота сгорания, ккал/кг	Молярный тепловой эффект химической реакции сгорания, 10 <sup>6</sup> ккал/моль	Сумма исходных веществ, кг, воздух/кислород	Энергетический (тротиловый) эквивалент	
						воздух	кислорода
Декалин	C <sub>10</sub> H <sub>18</sub>	135	11200	1500	2100/600	0,25	1,15
Декан	C <sub>10</sub> H <sub>22</sub>	142	10600	1505	2260/638	0,24	1,08
Дикетен	C <sub>8</sub> H <sub>4</sub> O <sub>2</sub>	84	5200*	437*	632/212	0,25	0,95
Диметиламин	C <sub>2</sub> H <sub>7</sub> N	45	8400	378	631/181	0,22	0,96
Диметиланилин	C <sub>8</sub> H <sub>11</sub> N	121	9250*	1120	1647/477	0,24	1,07
Диметилди (феноламинофенокси) силан	C <sub>26</sub> H <sub>26</sub> N <sub>2</sub> O <sub>2</sub> Si	426	8065	3420	5000/1496	0,24	1,03
Диметилдихлорсилан	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> SiCl <sub>2</sub>	129	1875*	242*	746/273	0,11	0,41
Диметилтерефталат	C <sub>10</sub> H <sub>10</sub> O <sub>4</sub>	194	5650*	1088*	1630/560	0,24	0,9
Диметилциклогексан	C <sub>8</sub> H <sub>16</sub>	112	11140*	1248*	1756/496	0,26	1,2
Диоксан	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> O <sub>2</sub>	88	6780*	588*	773/248	0,27	1,09
Диоксибензофенон	C <sub>13</sub> H <sub>10</sub> O <sub>3</sub>	214	6750*	1447*	2132/662	0,24	0,98
Дифенил	C <sub>12</sub> H <sub>10</sub>	154	10450	1610	2138/618	0,27	1,2
Дифенилолпропан	C <sub>15</sub> H <sub>16</sub> O <sub>2</sub>	228	8100	1852	2671/783	0,25	1,16
Дитизон (дифенилтиокарбазон)	C <sub>13</sub> H <sub>12</sub> SN <sub>4</sub>	264	6790*	1791*	2826/866	0,23	0,95
Дивтиловый эфир	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> O	74	8100	600	896/266	0,22	0,98
Изобутилен	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub>	56	10800	610	878/248	0,25	1,13
2-Метилбутадие-1,3 (изопрен)	C <sub>5</sub> H <sub>8</sub>	68	10500	714	1027/292	0,25	1,13
Изопропилфенилкарбамат	C <sub>10</sub> H <sub>18</sub> O <sub>2</sub> N	179	7300*	1295*	2371/691	0,2	0,82
Камфора	C <sub>10</sub> H <sub>16</sub> O	152	9320*	1414	2004/584	0,26	1,1
Канифоль	C <sub>20</sub> H <sub>30</sub> O <sub>2</sub>	302	9170	2750	4007/1167	0,25	1,08
Капролактан	C <sub>6</sub> H <sub>11</sub> ON	113	7100	802*	1313/393	0,22	0,94
Кетен	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> O	42	5240*	220*	306/106	0,26	0,95
Метан	CH <sub>4</sub>	16	11910	192	346/80	0,2	1,11
Моносилан	SiH <sub>4</sub>	32	9400*	305*	306/96	0,36	1,46
Мука ржаная	C <sub>4</sub> H <sub>6</sub> O <sub>2</sub>	102	3998	405	650/—	0,22	—
Нафталин	C <sub>10</sub> H <sub>8</sub>	128	9700*	1240*	1768/408	0,25	1,4
Нитробензол	C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> NO <sub>2</sub>	123	5970	734	1018/338	0,25	1
Нитрометан	CH <sub>3</sub> NO <sub>2</sub>	61	2880	176	233/101	0,27	0,8
л-Нитрозофенол	C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> NO <sub>2</sub>	123	5810	715	1213/373	0,21	0,9
Перекись лауроила	C <sub>23</sub> H <sub>46</sub> O <sub>4</sub>	399	8700	3480	4950/1456	0,25	1,1
Перекись метилэтилкетона	C <sub>8</sub> H <sub>16</sub> O <sub>4</sub>	176	4550	800	1406/464	0,2	0,8

Горючее вещество	Формула (общая)	Молярная масса	Удельная теплота сгорания, ккал/кг	Молярный тепловой эффект химической реакции сгорания, 10 <sup>6</sup> ккал/моль	Сумма исходных веществ, кг, воздух/кислорода	Энергетический (тротиловый) эквивалент	
						воздух	кислорода
Перекись третбутилбензоила	C <sub>11</sub> H <sub>14</sub> O <sub>3</sub>	194	6120	1190	1979/610	0,22	0,9
Пропан	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	44	12028	531	734/204	0,26	1,2
Пропилен	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>	42	10900	455	662/186	0,25	1,13
Пропилена окись	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> O	58	7983*	463*	606/186	0,27	1,13
Сера	S	32	2200	70	170/64	0,15	0,5
Сероуглерод	CS <sub>2</sub>	76	3350	252	487/168	0,19	0,7
Цианистоводородная (синильная) кислота	HCN	27	5900*	159	370/107	0,14	0,7
Стирол	C <sub>8</sub> H <sub>8</sub>	104	10115*	1052*	1474/424	0,26	1,14
Толуол	C <sub>7</sub> H <sub>8</sub>	92	10200	935	1332/382	0,26	1,12
Гексаметиленететрамин (уротропин)	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> N <sub>4</sub>	140	6400	895	1647/492	0,2	0,84
Фенантрен	C <sub>14</sub> H <sub>10</sub>	178	9506	1700	1464/478	0,42	1,6
Фенол	C <sub>6</sub> H <sub>6</sub> O	94	7787	733	1050/320	0,25	1,05
Формальдегид	CH <sub>2</sub> O	30	4100	123	167/62	0,26	0,4
Фталевый ангидрид	C <sub>8</sub> H <sub>4</sub> O <sub>3</sub>	148	5250	779	1078/388	0,24	0,93
Хинолин	C <sub>9</sub> H <sub>7</sub> N	129	8670*	1122*	1640/480	0,25	1,1
6-Этоксиди-2,4-гидро-2,4-триметилхинолин (хинол ЭД)	C <sub>11</sub> H <sub>19</sub> ON	217	8680	1886	2749/809	0,25	1,08
2-Хлорбутадие-1,3 (хлоропрен)	C <sub>4</sub> H <sub>5</sub> Cl	89	6200*	572*	774/249	0,26	1,03
Циклогексан	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub>	84	11150	936	1312/372	0,26	1,16
Циклогексанол (анол)	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> O	100	8900	889,5	1338/388	0,24	1,05
Циклогентан	C <sub>7</sub> H <sub>11</sub>	98	11200	1097	1536/436	0,26	1,16
Циклооктан	C <sub>8</sub> H <sub>16</sub>	112	11200*	1254	1756/496	0,26	1,17
Циклопентадиен-1,3	C <sub>5</sub> H <sub>6</sub>	66	12833*	847	957/274	0,33	1,42
Циклопропан	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>	42	10300	432,6	660/185	0,24	1,08
Щавелевая кислота	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	90	590*	53	228/122	0,1	0,2
Этан	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	30	11400	341	512/142	0,24	1,13
Этилбензол	C <sub>8</sub> H <sub>10</sub>	106	10277	1089	1542/442	0,25	1,13



Горючее вещество	Формула (общая)	Молярная масса	Удельная теплота сгорания, ккал/кг	Молярный тепловой эффект химической реакции сгорания, 10 <sup>3</sup> ккал/моль	Сумма исходных веществ, кг, воздух/кислород	Энергетический (тротиловый) эквивалент	
						воздух	кислород
Этилен	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	28	11 250	315	439/124	0,26	1,17
Этилена окись	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> O	44	6910*	304	386/124	0,27	1,13
Этиленимин	C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> N	43	8850*	380	572/163	0,22	1
Этанол	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> O	46	7130*	328	456/142	0,26	1,05
Этил хлористый	C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> Cl	65	5000*	327	651/209	0,18	0,72

\* Приведены расчетные данные.

Металлические порошки (аэрозвеси)

Металла	Символ	Атомная масса	Удельная теплота сгорания, ккал/кг	Молярный тепловой эффект сгорания в воздухе окисла, 10 <sup>3</sup> ккал/моль	Сумма исходных веществ, кг, воздух/кислород	Энергетический (тротиловый) эквивалент	
						воздух	кислород
Алюминий	Al	27	14820*	400 Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	260/102	0,55	1,8
Барий	Ba	56	2382*	133,4 BaO	123/72	0,39	0,85
Бериллий	Be	9	15000*	135 BeO	78/25	0,63	2,40
Бор	B	11	31700*	349 B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	228/70	0,55	2,3
Ванадий	V	51	5804*	296 V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	308/150	0,35	0,91
Вольфрам	W	184	1760*	324 W <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	698/448	0,17	0,33
Галлий	Ga	70	3660*	256 Ga <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	316/188	0,27	0,65
Гафний	Hf	179	1515*	272 HfO <sub>2</sub>	315/211	0,31	0,6
Германий	Ge	73	1753*	128 GeO <sub>2</sub>	210/105	0,22	0,56
Железо	Fe	56	3482*	195 Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	318/160	0,22	0,56
Индий	In	115	1940*	223 In <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	528/378	0,23	0,3
Иттрий	Y	89	4950*	440 Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	384/226	0,41	0,9
Кадмий	Cd	112	562*	63 CdO	181/128	0,12	0,23
Калий	K	39	3230*	126 K <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	284/126	0,16	0,46
Кальций	Ca	40	3780*	152 CaO	107/56	0,51	1,24
Кобальт	Co	59	3500*	210 Co <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	451/241	0,17	0,41
Кремний	Si	28	7430*	208 SiO <sub>2</sub>	164/60	0,44	1,6
Лантан	La	139	3880*	539 La <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	505/347	0,38	0,72
Литий	Li	7	20286*	142 Li <sub>2</sub> O	82/30	0,63	2,2

Металла	Символ	Атомная масса	Удельная теплота сгорания, ккал/кг	Молярный тепловой эффект сгорания в воздухе окисла, 10 <sup>3</sup> ккал/моль	Сумма исходных веществ, кг, воздух/кислород	Энергетический (тротиловый) эквивалент	
						воздух	кислород
Магний	Mg	24	6000	145 MgO	92/40	0,57	1,65
Марганец	Mn	55	4236*	233 Mn <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	316/158	0,28	0,68
Молибден	Mo	96	1874*	180 MoO <sub>3</sub>	302/144	0,22	0,56
Мышьяк	As	75	2906*	218 As <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	356/198	0,22	0,52
Натрий	Na	23	5174*	119 Na <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	182/78	0,24	0,7
Неодим	Nd	144	3021*	435 Nd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	491/336	0,32	0,62
Никель	Ni	59	983*	58 NiO	128/75	0,16	0,36
Ниобий	Nb	93	4976*	463 Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	516/266	0,32	0,8
Олово	Sn	119	1160*	138 SnO <sub>2</sub>	255/151	0,2	0,5
Празеодим	Pr	141	3113*	439 Pr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	488/330	0,32	0,62
Самарий	Sm	150	2866*	430 Sm <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	506/348	0,39	0,57
Скандий	Sc	45	9111*	410 Sc <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	296/138	0,5	1,36
Стронций	Sr	88	1600	141 SrO	154/103	0,33	0,63
Сурьма	Sb	122	1918*	234 Sb <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	574/324	0,15	0,33
Тантал	Ta	181	2700*	489 Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	642/442	0,27	0,51
Теллур	Te	128	650*	83 TeO <sub>2</sub>	264/160	0,12	0,24
Титан	Ti	48	4550	225 TiO <sub>2</sub>	185/80	0,44	1,3
Торий	Th	232	1426	331 ThO <sub>2</sub>	368/264	0,32	0,58
Уран	U	238	3605*	858 U <sub>3</sub> O <sub>8</sub>	1262/848	0,23	0,47
Хром	Cr	52	5550*	289 Cr <sub>2</sub> O	173/120	0,6	1,1
Цезий	Cs	133	1234*	164 Cs <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	540/330	0,11	0,23
Церий	Ce	140	1660*	233 CeO <sub>2</sub>	277/172	0,3	0,63
Цинк	Zn	65	1276*	83 ZnO	134/81	0,23	0,47
Цирконий	Zr	91	2860	262 ZrO <sub>2</sub>	228/123	0,41	1

\*Приведены расчетные данные. При отсутствии справочных данных использованы стандартные теплоты образования соответствующих окислов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. В. В. Адушкин, С. М. Когарко, А. Г. Лямин. Расчет безопасных расстояний при газовом взрыве в атмосфере. — В сб.: Свойства взрывчатых материалов и их совершенствование, № 75/32. М., Недра, 1975.
2. Я. К. Трошин, К. Я. Трошин. О распространении горения в конденсированных взрывчатых веществах. — В сб.: Свойства взрывчатых материалов и их совершенствование, № 75/32. М., Недра, 1975.
3. Инструкция по определению площади легкобрасываемых конструкций, СН 502-77. М., Стройиздат, 1978.