

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

А.А. Евдокимов, В.В. Кисс

**ПРОЦЕССЫ ГОРЕНИЯ
И ВЗРЫВА**

Учебно-методическое пособие

 **УНИВЕРСИТЕТ ИТМО**

Санкт-Петербург
2016

УДК 536.46; 614.84; 662.4; 699.81; 699.887

Евдокимов А.А., Кисс В.В. Процессы горения и взрыва: Учеб.-метод. пособие. – СПб.: Университет ИТМО, 2016. – 40 с.

Посвящено изучению одной из важнейших проблем: профилактике пожаров и взрывов. Приводятся особенности протекания процессов горения как в кинетической, так и в диффузионной области. Разъясняются методики расчётов параметров горения и взрыва с учётом исходных данных. Формулируются проблемы пожарной безопасности и принципы их решения. Даются основные положения законодательства в области пожарной безопасности и основные требования к проектированию и строительству зданий и сооружений, обеспечивающие безопасность их эксплуатации.

Предназначено для бакалавров направлений 38.03.02, 14.03.01, 16.03.03, 15.03.02, 23.03.03, 15.03.04, 19.03.01, 19.03.02, 19.03.03 по дисциплине «Безопасность жизнедеятельности» очной и заочной форм обучения.

Рецензент: доктор техн. наук, проф. Т.В. Меледина

Рекомендовано к печати Советом факультета пищевых биотехнологий и инженерии, протокол № 1 от 19.09.2016 г.



Университет ИТМО – ведущий вуз России в области информационных и фотонных технологий, один из немногих российских вузов, получивших в 2009 году статус национального исследовательского университета. С 2013 года Университет ИТМО – участник программы повышения конкурентоспособности российских университетов среди ведущих мировых научно-образовательных центров, известной как проект «5 – 100». Цель Университета ИТМО – становление исследовательского университета мирового уровня, предпринимательского по типу, ориентированного на интернационализацию всех направлений деятельности.

© Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, 2016

© Евдокимов А.А., Кисс В.В., 2016

ВВЕДЕНИЕ ЧТО НЕОБХОДИМО ЗНАТЬ О ГОРЕНИИ

Горение, как окислительно-восстановительная реакция, может протекать только в среде, содержащей окислитель. Самый сильный окислитель – это фтор. Он способен окислить почти все химические элементы и содержащие их вещества. Поэтому свободного фтора в атмосфере земли нет, а присутствие фторсодержащих соединений (фреонов) оказывает на процесс горения сильное флегматизирующее действие. В среде хлора легко воспламеняются и сгорают вещества и материалы, неспособные гореть в воздухе. Например, железный гвоздь в чистом газообразном хлоре горит подобно магниевому «бенгальскому огню» в воздухе. К сильным окислителям относятся и другие элементы группы галоидов. Так, пары йода хорошо окисляют сплавы драгоценных металлов. Именно поэтому серебряные и золотые изделия не рекомендуется хранить рядом с аптечкой, где присутствуют пары йода.

В атмосфере земли (*сухом лесном воздухе*) содержится ~ 20,95 % кислорода (в помещениях, где живут и работают люди, ~ 19–20 %), поэтому вероятность появления огня и, как следствие, взрыва определяется чаще всего именно присутствием кислорода. Особенно активен атомарный кислород, образующийся, например, при нагревании перекисных соединений, хлорной извести или марганцево-кислого калия, а также при разложении озона. Поэтому вещества, хранение и переработка которых сопряжены с возможностью образования атомарного кислорода, считаются с точки зрения пожарной профилактики **чрезвычайно** опасными.

Способность веществ окисляться в атмосфере земли называют горючестью. Элементы, входящие в состав горючего вещества, способны взаимодействовать с кислородом до полного насыщения, которое определяется их максимальной валентностью. Углерод – до CO_2 , фосфор – до P_2O_5 , сера – до SO_3 . Поэтому горючими являются не только чистые углерод, фосфор и сера, но и продукты их неполного окисления: CO , P_2O_3 , SO_2 . Лёгкость, с которой может воспламениться горючее вещество, называют горючестью.

Термином «горение» (в широком смысле этого слова) обозначают не только процесс химического взаимодействия, но также все те физико-химические процессы, которые сопровождают химическую реакцию: нагревание, плавление, испарение, перемешивание. Химическая реакция протекает намного быстрее, чем массо- и теплообмен, включая фазовые превращения. Поэтому различают горение кинетическое (со скоростью

химической реакции) и диффузионное, скорость которого ограничена скоростями массо- и теплообмена (нагрева, плавления, испарения, перемешивания).

При горении выделяется большое количество энергии, в том числе и в оптической области электромагнитных излучений: и в инфракрасной, и в видимой областях спектра. Поэтому мы **видим** пламя, и это отличает процесс горения от подобных окислительно-восстановительных реакций (тления или гниения), протекающих намного медленнее. Энергия экзотермической реакции, излучаемой в широком диапазоне электромагнитных волн, может даже при сравнительно невысокой температуре передаваться **отдельным** молекулам окислителя или горючего вещества, способствуя преодолению порога активации. Это объясняет **автокаталитический механизм процесса горения**.

1. ПРОБЛЕМЫ ПОЖАРНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

Одна из основных причин возникновения чрезвычайных ситуаций – это пожары и взрывы. Раздел знаний, объединённый общим термином **пожарная профилактика**, включает как научные основы физической химии, так и практические вопросы, позволяющие:

- предотвращать появление огня (**профилактика возгораний**);
- исключать условия его распространения (**локализация очагов пожара**);
- обнаруживать возгорания на ранних стадиях и принимать необходимые меры по их ликвидации (**пожарная сигнализация и связь**);
- **эвакуировать людей** из опасных зон до наступления критической фазы, когда опасность для их жизни и здоровья становится вполне реальной;
- разрабатывать **эффективные средства пожаротушения** (технические и первичные);
- обучать работников действующих предприятий принимать меры по борьбе с возгораниями до появления боевого пожарного расчёта, **организовывать работу добровольных пожарных дружин и оснащать рабочие места первичными средствами пожаротушения**.

2. УСЛОВИЯ ПОЯВЛЕНИЯ ОГНЯ И ПРИНЦИПЫ ЕГО ПРОФИЛАКТИКИ

Для начала процесса горения необходимы следующие условия:

- наличие *горючего вещества*;
- наличие *окислителя*;
- **контакт** горючего вещества с окислителем (парогазовая смесь, аэрозоль);
- **температура** не ниже температуры воспламенения горючего вещества;
- источник энергии активации исходных продуктов – **инициатор процесса**;
- **отсутствие флегматизирующих факторов**, подавляющих активацию.

Если *хотя бы одно* из перечисленных выше условий не соблюдается, возгорание становится **невозможным**. Это позволяет сформулировать **принципы профилактики появления огня**:

1. **Не допускать присутствия горючих веществ**. Этот принцип реализуется на большинстве металлургических и машиностроительных предприятий. Высокие температуры, расплавленный металл, свободный доступ воздуха к обрабатываемым изделиям не представляют пожарной опасности, поскольку присутствие горючих веществ запрещено регламентом.

2. **Не допускать присутствия окислителя**. Уголь в пластах под слоем грунта не может воспламениться без доступа кислорода. Пускатели электромашин и разъединители высоковольтных устройств, работа которых сопровождается возникновением электрической дуги, выполняют в сосудах, доверху заполненных маслом.

3. **Не допускать контакта горючего вещества с окислителем**. Разделяют пространства, где эти вещества присутствуют, герметизируют разделяющие стенки, используют разделяющую негорючую среду, например при перевозке нефтепродуктов под слоем «инертных газов».

4. **Хранить горючие жидкости при температуре ниже температуры их воспламенения**.

5. **Строго соблюдать противопожарный режим на пожаро- и взрывоопасных производствах, исключаящий присутствие инициаторов процесса горения** (спичек, зажигалок, искрящих приборов и инструментов). Использовать **молниезащиту** зданий, сооружений и только **взрывобезопасное** оборудование; предотвращать накопление зарядов **статического электричества** на оборудовании и материалах.

6. *Использовать флегматизирующие факторы* (узкие щели, негорючие пыли и туманы, инертные газы, галоидоалкилы, недостаток окислителя).

3. ПОЖАРНАЯ ОПАСНОСТЬ ВЕЩЕСТВ КЛАССИФИКАЦИЯ ПОМЕЩЕНИЙ И ЗОН

Наиболее пожароопасны *вещества, способные воспламеняться при контакте с воздухом или с водой без дополнительных условий*. К ним относятся белый фосфор, самовоспламеняющийся при контакте с воздухом, и все щелочные металлы, реагирующие с влагой с образованием водорода, смесь которого с воздухом (гремучий газ) легко самовоспламеняется при быстром повышении температуры, характеризующем экзотермическую реакцию.

Чрезвычайно опасны в пожарном отношении *пары и газы*, образующие с воздухом взрывоопасные смеси: *парафины, олефины, спирты, альдегиды, кетоны, простые и сложные эфиры, сероуглерод, сероводород, аммиак и др.* Столь же опасны *легко воспламеняющиеся жидкости* (ЛВЖ), пары которых вспыхивают от источника воспламенения даже при температуре ≤ 28 °С.

Менее летучие *горючие жидкости* (ГЖ) разделяют на 3 группы: с температурой *вспышки* в пределах 28–61 °С, 61–128 °С и свыше 128 °С. Образовать пожаро- и взрывоопасные смеси с воздухом эти жидкости могут либо при их интенсивном нагревании, когда скорость испарения достаточна для поддержания стабильного пламени (не ниже *температуры воспламенения*), либо при условии образования *аэрозолей* (туманов).

Столь же опасны и *пылевидные твёрдые горючие вещества*, способные образовывать с воздухом взрывоопасные аэрозоли (дымы): угольная и древесная пыль, мука, растительные и синтетические волокна. К менее опасным относят твёрдые горючие вещества, неспособные перейти во взвешенное состояние и образовать с воздухом аэрозоли: куски антрацита, дрова в поленнице, мешки с зерном и т. д.

В зависимости от уровня пожарной опасности перерабатываемых или используемых в производстве горючих веществ, а также от условий протекания производственных процессов классифицируются и помещения, в которых эти процессы реализуются [1].

Взрывопожароопасными считаются помещения, где может образоваться взрывоопасная смесь горючего вещества с воздухом. Причём, если скачок давления при взрыве может превысить **5 кПа**,

то помещение относят либо к категории **А** (если образуется гомогенная взрывоопасная смесь), либо к категории **Б** (если образующаяся взрывоопасная смесь гетерогенна). Взрыво- и пожароопасные помещения, где скачок давления при взрыве не может превысить **5 кПа**, относят к категории **В**. К этой же категории относят помещения, где хранятся или перерабатываются горючие жидкости и твёрдые горючие вещества в условиях, исключающих образование взрывоопасных смесей с воздухом. К пожаро-взрывоопасной категории **Г** относят помещения, в которых **горючие вещества не хранятся** (даже если они используются, например утилизируются, в виде топлива), а также помещения, где **негорючие материалы используются в раскалённом или расплавленном состоянии**, что сопряжено с опасностью воспламенения горючих веществ или материалов, если таковые окажутся в этом помещении в ситуации, не предусмотренной регламентом производства. К непожароопасной категории **Д** относят помещения, где перерабатываются, используются или хранятся **негорючие вещества в холодном состоянии**.

Приведённая классификации помещений характеризует принципиальную возможность возникновения в них нештатной ситуации (воспламенения и взрыва), но не информирует о её вероятности. Для оценки вероятности возникновения чрезвычайной ситуации, существует **классификация зон** производственных помещений [2].

Классы взрывопожароопасных зон (в отличие от категорий помещений) обозначают только буквой **В**, а пожароопасных – **П**. Римская цифра **I** после **В** означает, что в рассматриваемой зоне может образоваться **гомогенная** взрывоопасная смесь (с парами или газами горючего вещества), а римская цифра **II** – что образоваться может **гетерогенная** взрывоопасная смесь (с капельками или пылинками горючего вещества). Буква, следующая за римской цифрой в обозначении класса взрывоопасной зоны, указывает, **насколько вероятно возникновение нештатной ситуации** в реальном производстве. Если никакой буквы нет (**В–I** или **В–II**), это означает, что наличие взрывоопасной смеси учтено регламентом производства (норма, штатная ситуация). Например, к классу **В–I** относят боксы для напыления эмали на кузова автомобилей, когда содержание паров растворителя (ЛВЖ) в атмосфере бокса всегда является взрывоопасным. Буква **а** после римской цифры в обозначении класса взрывоопасной зоны (**В–Ia** или **В–IIa**) означает, что в штатных ситуациях, предусмотренных регламентом, взрывоопасная смесь образоваться не может. Это может произойти только при аварии. Буква **б** (класс **В–Iб** или **В–IIб**) – что такая нештатная ситуация маловероятна. Например, нижний концентрационный предел взрываемости (НКПВ) горючего про-

дукта очень высок, и его достижение маловероятно. Например, класс зоны аммиачной компрессорной **В–Іб**, поскольку НКПВ аммиака – более 15 % по объёму, а концентрация его в ВРЗ уже 1,5–2,0 % является смертельно опасной. Или, если рассматривая зона – это помещение, смежное с зоной класса **В–Іа**. Буквой **в** (в обозначении касса **В–Ів** или **В–Ів**) обозначают помещения, смежные с зонами **В–Іб** или **В–Іб**. Буквой **г** (**В–Іг** или **В–Іг**) обозначают наружные установки. Склады **жидких горючих веществ** характеризуются классом зоны **П–І**, а **твёрдых** – классом зоны **П–ІІ**.

Здания и части зданий – помещения или группы помещений, функционально связанных между собой, по пожарной опасности подразделяются на **классы** [3] в зависимости от **способа их использования** и от того, в какой мере безопасность людей, находящихся в них, в случае возникновения пожара находится под угрозой, с учетом их возраста, физического состояния, возможности пребывания в состоянии сна, вида основного функционального контингента и его количества:

Ф1. Для постоянного проживания и временного (в том числе круглосуточного) пребывания людей (помещения в этих зданиях, как правило, используются круглосуточно, контингент людей в них может иметь различный возраст и физическое состояние, для этих зданий характерно наличие спальных помещений):

Ф1.1. Детские дошкольные учреждения, специализированные дома престарелых и инвалидов (неквартирные), больницы, спальные корпуса школ-интернатов и детских учреждений.

Ф1.2. Гостиницы, общежития, спальные корпуса санаториев и домов отдыха общего типа, кемпингов, мотелей и пансионатов.

Ф1.3. Многоквартирные жилые дома.

Ф1.4. Одноквартирные, в том числе блокированные, жилые дома.

Ф2. Зрелищные и культурно-просветительные учреждения (основные помещения в этих зданиях характерны массовым пребыванием посетителей в определенные периоды времени):

Ф2.1. Театры, кинотеатры, концертные залы, клубы, цирки, спортивные сооружения с трибунами, библиотеки и другие учреждения с расчетным числом посадочных мест для посетителей в закрытых помещениях.

Ф2.2. Музеи, выставки, танцевальные залы и другие подобные учреждения в закрытых помещениях.

Ф2.3. Учреждения, указанные в Ф2.1, на открытом воздухе.

Ф2.4. Учреждения, указанные в Ф2.2, на открытом воздухе.

Ф3. Предприятия по обслуживанию населения (помещения этих предприятий характеризуются большей численностью посетителей, чем обслуживающего персонала):

Ф3.1. Предприятия торговли.

Ф3.2. Предприятия общественного питания.

Ф3.3. Вокзалы.

Ф3.4. Поликлиники и амбулатории.

Ф3.5. Помещения для посетителей предприятий бытового и коммунального обслуживания (почт, сберегательных касс, транспортных агентств, юридических консультаций, нотариальных контор, прачечных, ателье по пошиву и ремонту обуви и одежды, химической чистки, парикмахерских и других подобных, в том числе ритуальных и культовых учреждений) с нерасчетным числом посадочных мест для посетителей.

Ф3.6. Физкультурно-оздоровительные комплексы и спортивно-тренировочные учреждения без трибун для зрителей, бытовые помещения, бани.

Ф4. Учебные заведения, научные и проектные организации, учреждения управления (помещения в этих зданиях используются в течение суток некоторое время, в них находится, как правило, постоянный, привыкший к местным условиям контингент людей определенного возраста и физического состояния):

Ф4.1. Школы, внешкольные учебные заведения, средние специальные учебные заведения, профессионально-технические училища.

Ф4.2. Высшие учебные заведения, учреждения повышения квалификации.

Ф4.3. Учреждения органов управления, проектно-конструкторские организации, информационные и редакционно-издательские организации, научно-исследовательские организации, банки, конторы, офисы.

Ф4.4. Пожарные депо.

Ф5. Производственные и складские здания, сооружения и помещения (для помещений этого класса характерно наличие постоянного контингента работающих, в т. ч. круглосуточно):

Ф5.1. Производственные здания и сооружения, производственные и лабораторные помещения, мастерские.

Ф5.2. Складские здания и сооружения, стоянки для автомобилей без технического обслуживания и ремонта, книгохранилища, архивы, складские помещения.

Ф5.3. Сельскохозяйственные здания.

*Производственные и складские помещения, в том числе лаборатории и мастерские в зданиях классов **Ф1**, **Ф2**, **Ф3** и **Ф4**, относятся к классу **Ф5**.*

4. ХИМИЗМ ПРОЦЕССА ГОРЕНИЯ

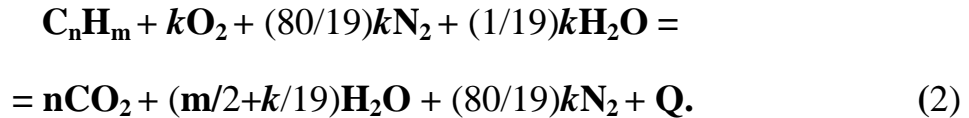
Окисление углеводородов в среде чистого кислорода протекает по схеме



где Q – тепловой эффект экзотермической реакции.

Серьёзную опасность представляют как чистый кислород, так и его смеси, например с азотом (воздух). Причём с повышением концентрации кислорода в газовой смеси опасность возгорания повышается. Чтобы упростить расчёт процессов горения, обеспечивая достаточную для инженерных расчётов точность, принимают, что в воздухе производственных помещений, состав которого соответствует санитарным требованиям [4, 5], содержится (в объёмных долях): азота и инертных газов (будем обозначать N_2) ~ 0,80; кислорода (O_2) ~ 0,19; водяных паров (H_2O) ~ 0,01.

В таком случае взаимодействие углеводородов с воздухом, содержащим *эквимольное* количество кислорода [см. формулу (1)], следовало записать таким образом:



Стехиометрический коэффициент k можно рассчитать из условия материального баланса:

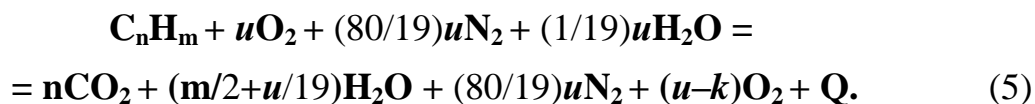
$$k = (2n + m/2)/2. \quad (3)$$

Чтобы рассчитать количество кислорода Y , необходимое для сжигания X кг горючего вещества, достаточно составить пропорцию

$$Y/X = 32k/(12n + m) \quad (4)$$

и найти численное значение Y , решив уравнение (4).

На практике соотношения содержаний окислителя и горючего вещества чаще не соответствуют эквимольным. Процесс горения в этом случае заканчивается при полном исчерпании одного из реагирующих веществ. Избыток непрореагировавшего вещества оказывает заметное влияние на параметры процесса. Например, если в исходной смеси на каждую молекулу горючего вещества приходится u молекул O_2 ($u > k$), то процесс горения следует описать следующим уравнением:



Чтобы обеспечить полное сгорание органического топлива, в зону горения чаще всего подаётся воздух с коэффициентом избытка 1,10–1,20. При большом избытке воздуха процесс горения не всегда ускоряется, а может даже замедляться (эффект флегматизации объясняется тем, что вероятность *непродуктивных* столкновений молекул реагирующих веществ заметно увеличивается, что приводит к потерям энергии, необходимой для поддержания цепного механизма процесса горения). Эффект флегматизации может оказаться настолько значительным, что горение может вовсе прекратиться даже при наличии реагирующих веществ и источников инициирования. Это наблюдается как при большом избытке горючего вещества (выше верхнего концентрационного предела воспламенения), так и при большом избытке окислителя, когда концентрация горючего вещества меньше нижнего концентрационного предела воспламенения. Все другие вещества, присутствующие в зоне горения, но не участвующие в реакции, тоже оказывают флегматизирующее действие (азот, инертные газы), а в особенности – продукты реакции горения (водяные пары и диоксид углерода). Ещё более ярко выраженное флегматизирующее действие оказывают на процесс частички негорючей дисперсной фазы (пыль, туман) и расположенные вблизи твёрдые поверхности (стенки камеры сгорания, металлическая проволока шахтёрской лампы).

Если известно количество горючего вещества M , из уравнения (4) нетрудно рассчитать массу всей горючей смеси M^* и каждого из компонентов, участвующих в реакции. При этом для углеводородов парафинового ряда потребность в кислороде и теплотворная способность с увеличением числа атомов углерода (свыше 20) практически не изменяется.

5. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ВЗРЫВА

Если соблюдены все условия, необходимые для горения, то химическая реакция взаимодействия горючего вещества с окислителем протекает очень быстро (кинетическое горение). Время протекания такой реакции для паро- и газоздушных смесей, где соотношение взаимодействующих веществ мало отличается от эквимольного, составляет несколько миллисекунд и в расчётах принимают 0,1 с.

В отсутствие фазовых переходов (когда пары воды, образовавшейся в процессе горения, ещё не начали конденсироваться) выделяющееся тепло Q вызывает увеличение теплосодержания горючей смеси от I_1 до I_2 , из чего следует

$$i_2 - i_1 = Q/M, \quad (6)$$

где i_1 и i_2 – удельное теплосодержание смеси перед началом реакции и по её окончании, соответственно. При этом температура смеси изменяется от t_1 до t_2 .

Можно допустить, что удельная теплоёмкость горючей смеси изменяется незначительно ($C_v - \text{const}$), тогда

$$t_2 - t_1 = (i_2 - i_1)/C_v. \quad (7)$$

Зная теплотворную способность топлива q и его долю в исходной горючей смеси $\omega = M/M^*$, можно рассчитать [с учётом (6) и (7)] конечное значение температуры процесса t_2 (теоретическую температуру горения):

$$t_2 = t_1 + q\omega/C_v. \quad (8)$$

Уравнение Клазиуса–Клайперона для случая, когда в результате химического взаимодействия число граммолей изменяется (от Σn_1 в исходной смеси до Σn_2 в продуктах реакции), можно записать в виде

$$\frac{P_2 V_2}{T_2 \Sigma n_2} = \frac{P_1 V_1}{T_1 \Sigma n_1}, \quad (9)$$

где индексом «1» отмечены параметры исходных продуктов перед началом реакции, а индексом «2» – параметры, характеризующие продукты реакции в момент её окончания. Для случая взаимодействия эквимольных количеств реагирующих веществ [см. формулу (2)]

$$\Sigma n_2 = (n + m/2) + (80/19 + 1/19) \cdot (2n + m/2)/2,$$

а

$$\Sigma n_1 = 1 + (1 + 80/19 + 1/19) (2n + m/2)/2.$$

При избытке кислорода [см. формулу (5)]

$$\Sigma n_2 = (n + m/2) + (80/19 + 1/19) \cdot u + u - (2n + m/2)/2$$

и

$$\Sigma n_1 = 1 + (1 + 80/19 + 1/19)u.$$

Объём в расчётах процессов горения, протекающих в кинетической области, принимают равным объёму аппарата или помещения, где предполагается протекание такой реакции. Исходная температура T_1 , как правило, известна, а температуру T_2 принимают равной теоретической температуре горения, которую рассчитывают по формуле (8). Тогда

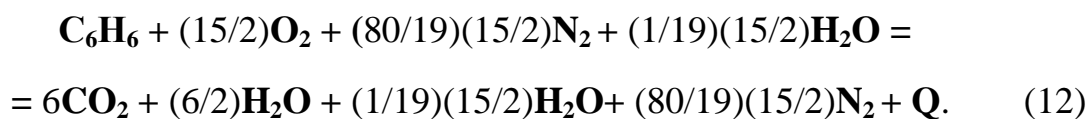
$$T_2 = \frac{q \cdot \omega_{\text{угв}}}{C_v} + T_1. \quad (10)$$

Конечное значение давления в аппарате – *давление взрыва* – можно определить, решив уравнение (9) с учётом его герметичности ($V_2 = V_1$):

$$P_2 = P_1 \frac{T_2 \Sigma n_2}{T_1 \Sigma n_1}. \quad (11)$$

Пример. В аппарате объёмом 10 м^3 , заполненном воздухом с исходной температурой $20 \text{ }^\circ\text{C}$, сгорает 780 г бензола (C_6H_6). Теплота сгорания бензола 40 МДж/кг . Необходимо определить: состав продуктов, образовавшихся в процессе горения; температуру, до которой нагреется воздух в аппарате в процессе горения (потерями тепла пренебречь), и давление, которое установится в аппарате, если аппарат сохраняет герметичность.

Решение. В 780 г бензола содержится $780/78 = 10 \text{ гмол}$, которые занимают объём $10 \cdot 22,4 = 224 \text{ л}$. В 10 м^3 это составит $2,24 \%$, что находится в пределах воспламенения бензола ($1,41\text{--}6,75 \%$, см. приложение 2). Следовательно, реакция будет протекать со взрывом. Реакцию взаимодействия бензола с эквимолярным количеством воздуха, учитывая (2)–(4), можно описать уравнением



Из уравнения (12) следует, что для сгорания 1 гмол бензола (78 г) потребуется 7,5 гмол кислорода (240 г), а в качестве продуктов реакции образуется 6 гмол CO_2 (264 г) и 3 гмол H_2O (54 г). Следовательно, для сгорания 780 г бензола (10 гмол) потребуется $240 \cdot 10 = 2400$ г кислорода или 75 гмол.

В аппарате объёмом 10 м^3 при атмосферном давлении и температуре 293К находится $\Sigma n_1 = 10^4/22,4 = 446,55$ гмол газовой смеси, в том числе 10 гмол бензола и $0,19 \cdot (446,55 - 10) = 82,95$ гмол кислорода. Этого количества кислорода будет достаточно для полного сгорания 780 г бензола ($82,95 > 75$). В реакции будут участвовать $10+75 = 85$ гмол, а остальная часть смеси $446,55 - 75 = 336,58$ гмол в процессе горения не участвует.

В результате горения 10 гмол бензола и 75 гмол кислорода превращаются в $10 \cdot 6 = 60$ гмол CO_2 и $10 \cdot 3 = 30$ гмол H_2O . Число гмолей реагирующих веществ изменится от 85 до 90, т.е. увеличится на 5 гмол. При этом *общее* число гмолей газообразных веществ, присутствующих в аппарате, увеличится до

$$\Sigma n_2 = 446,55 + 5 = 451,55 \text{ гмол.}$$

Весовая доля бензола в исходной смеси $\omega_{\text{угв}} \approx 780/12950 \approx 0,06$. Низшая теплота сгорания бензола $q = 40$ МДж/кг. Удельная теплоёмкость исходной смеси и продуктов реакции можно принять $C_v = 786,4$ Дж/(кг·К) (90 % воздуха) [6].

Тогда теоретическая температура горения с учётом (10):

$$T_2 = 40 \cdot 10^6 \cdot 0,06/786,4 + 293 = 3345 \text{ К,}$$

а давление взрыва, рассчитанное по формуле (11),

$$P_2 = 101336 \frac{3345 \cdot 451,55}{293 \cdot 446,55} = 1169844 \text{ Па (или 11,7 ат).}$$

Примечания:

1. Если паров бензола в том же аппарате находилось, например, вдвое больше, то для полного его сгорания потребовалось бы 150 гмол кислорода (это больше, чем 82,95). По этой причине процесс горения

протекал бы до тех пор, пока не закончился кислород, и часть бензола осталась бы несгоревшей.

2. Для производственников рассмотренные примеры практического интереса не представляют, поскольку знать заранее, сколько паров бензола находится в атмосфере помещения, не проводя соответствующих анализов, невозможно. В ряде случаев можно рассчитать ожидаемую концентрацию горючего вещества, например в случае его разлива.

2.1. Если с момента разлива прошло достаточно много времени и пары горючего вещества достигли состояния насыщения, то объёмную (и молярную) долю паров бензола можно определить как парциальное давление насыщенных паров бензола при заданной температуре (293 К), $P_{\text{бенз}} = 74,7$ мм рт. ст. Тогда из условия

$$Y = P_{\text{бенз}}/P_{\Sigma} \quad (13)$$

молярная доля бензола составит $Y \approx 74,7/760 \approx 0,098$ и его количество в рассматриваемом помещении достигнет $0,098 \cdot 446,55 = 44,12$ гмол.

Если времени с момента разлива прошло немного, то количество испарённого вещества можно определить, рассчитав скорость его испарения по формуле

$$G_{\text{исп.}} = (0,352 + 0,786w) P_s F \cdot 10^{-3} \text{ кг/ч}, \quad (14)$$

где M – молекулярный вес жидкости; w – скорость движения воздуха параллельно источнику испарения, м/с; P_s – давление насыщенного пара, мм рт. ст.; F – поверхность испарения, м².

6. ОПАСНОСТИ, СОПРОВОЖДАЮЩИЕ ПОЖАРЫ И ВЗРЫВЫ

Даже кратковременное действие огня и резкое повышение давления могут оказаться для человека весьма опасными. Однако наибольшую опасность представляют последствия этих событий. Так, взрыв в закрытом объёме (аппарат, камера, топка) сопровождается резким изменением давления, в несколько раз превышающем атмосферное (см. разд. 5). Такой перепад, как правило, не в состоянии выдержать стенки аппарата, вследствие чего выброс продуктов реакции в атмосферу помещения неизбежно приведёт к повышению давления в этом помещении и разрушению строительных конструкций всего здания. Таким образом, основная опасность взрывов – это обрушение строительных конструкций

зданий, приводящее к массовой гибели людей. С учётом приведённых обстоятельств к основным мерам по защите людей от взрывов следует отнести, кроме профилактики взрывоопасных процессов, защиту строительных конструкций здания от разрушения. С этой целью всё взрывоопасное оборудование размещают в основном снаружи здания. Оборудование, которое по каким-то причинам приходится размещать внутри, устанавливают непосредственно у наружной его стены, выполняя всю площадь контакта аппарата и стены здания **легкоразрушаемой (взрывной клапан)**. Например, в печном отделении хлебозавода газовую топку и первое колено дымохода (боров) располагают непосредственно **у проёма в наружной стене здания**, прикрывая его тонкостенным лёгким листом (**ЛСК – легко сбрасываемая конструкция**), защищённым слоем теплоизоляции.

По той же причине оборудование, эксплуатируемое под избыточным давлением паров или газов (классные аппараты), испытывают не воздухом, а **водой**. Высокие колонны, гидравлические испытания которых сопряжены с большими затратами, располагают только снаружи зданий и испытывают давлением воздуха, не превышающим максимального рабочего. Компрессорные отделения располагают в одноэтажных зданиях. Роль взрывных клапанов играют в них окна с большой поверхностью остекления и/или свободно приподнимающаяся лёгкая кровля (ЛСК). Даже при небольшом перепаде давления (менее 5 кПа) указанные конструкции обеспечивают условия для выброса избыточного количества газообразных продуктов из компрессорного отделения наружу без разрушения несущих строительных конструкций здания.

При пожаре, когда процессы горения протекают в диффузионной области, фактором, определяющим опасность, является время наступления условий, непригодных для пребывания людей, – **критической фазы**.

Известно, что повышение температуры живого белка свыше 42 °С приводит к его денатурации (омертвлению). Такая опасность становится вполне реальной при пожаре, когда **температура воздуха в помещении достигает 60 °С (порог критической фазы)**.

Не меньшую опасность представляет для человека изменение состава воздуха. Известно, что при снижении содержания кислорода до 15 % у большинства людей возникают проблемы с кислородным обменом, а **при концентрации кислорода менее 14 % (порог критической фазы)** уже развивается процесс отравления диоксидом углерода, содержание которого в воздухе, как правило, увеличивается при этом **до 6% и более**.

Существует также опасность распространения зоны горения на близлежащие объекты (здания, сооружения, хранилища).

7. ЛОКАЛИЗАЦИЯ ПОЖАРОВ

Для того чтобы исключить возможность распространения огня внутри здания, при их проектировании предусмотрены требования к огнестойкости их строительных конструкций (преграды огню), а чтобы исключить распространение огня на близлежащие здания и строения, предусмотрены противопожарные разрывы между зданиями разной степени огнестойкости (табл. 1 и 2).

Таблица 1

Противопожарные разрывы между зданиями разной степени огнестойкости, м

Степень огнестойкости зданий	Противопожарный разрыв (не менее), м				
	I	II	III	IV	V
I	–	–	9	12	12
II	–	–	9	12	12
III	9	9	12	15	15
IV	12	12	15	18	18
V	12	12	15	18	18

Таблица 2

Пределы огнестойкости конструктивных элементов зданий разной степени огнестойкости, мин (не менее)

Конструктивные элементы зданий	Степень огнестойкости зданий				
	I	II	III	IV	V
Несущие элементы зданий	120	90	45	15	–
Наружные несущие стены	30	15	15	15	–
Перекрытия межэтажные	60	45	45	15	–
Настилы бесчердачных покрытий	30	15	15	15	–
Фермы, балки, прогоны бесчердачных покрытий	30	15	15	15	–
Внутренние площадки лестничных клеток	120	90	60	45	–
Марши лестниц	60	60	45	15	–

8. ЗАЩИТА ЗДАНИЙ ОТ РАЗРУШЕНИЯ ПРИ ВЗРЫВЕ ВЗРЫВНЫЕ КЛАПАНЫ

Скорость истечения продуктов горения определяют по формулам, выведенным для случая адиабатического сжатия смеси. Время горения при взрыве пылевых смесей принимают 0,4–0,5 с, газоздушных – 0,1–0,2 с, а паровоздушных – 0,3 с [7]. Для уточнения приведенных значений для различных смесей проводят необходимые исследования.

Сечение легкобрасываемых конструкций определяют по формуле

$$F_{в.л.} = \frac{\Delta W_{вт}}{33,5 \tau_{в} \cdot \{T_{в} [1 - (P_a/P_{доп})^{(k-1)/k}]\}^{0,5}}, \quad (15)$$

где $T_{в}$ – температура горения при взрыве, К; P_a – начальное давление смеси до взрыва, Па; $P_{доп}$ – допускаемое давление на конструкции, Па; k – показатель адиабаты, принимаемый 1,4.

Для частных случаев, когда $P_{доп} = 0,15$,

$$F_{в.л.} = \frac{\Delta W_{вт}}{6,7 \tau_{в} T_{в}^{0,5}}. \quad (16)$$

В общем случае при проектировании и строительстве зданий площадь сечения легкобрасываемых конструкций (или взрывных люков) принимают из расчета 0,05 м² на 1 м³ объема здания при размещении в нем производств категории **A** по пожарной опасности и 0,03 м² на 1 м³ при размещении производств категории **B**. Однако этот норматив (0,05 м²/м³) для некоторых газоздушных смесей недостаточен. Так, для водородно-воздушных смесей его следует принимать не менее 0,1–0,13 м² на 1 м³ объема здания [7].

9. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВРЕМЕНИ НАСТУПЛЕНИЯ КРИТИЧЕСКОЙ ФАЗЫ

При пожаре в замкнутом объеме время $\tau_{кр}$, необходимое для нагрева воздуха до критической температуры, определяют из условия теплового баланса с учетом теплового эффекта реакции Q , характери-

зующего горящее вещество, скорости его выгорания n , объёма помещения $W_{\text{пом}}$ и относительных теплотерь на нагрев строительных конструкций здания φ (принимается в среднем $\varphi \approx 0,5$).

При горении жидкостей (ЛВЖ и ГЖ) учитывается также площадь поверхности горения f :

$$\tau_{\text{кр}} = \frac{W_{\text{пом}} \cdot C \cdot (t_{\text{кр}} - t_{\text{нач}})}{(1 - \varphi) \cdot Q \cdot f \cdot n}, \quad (17)$$

где C – удельная теплоёмкость воздуха, кДж/м³.

При горении твёрдых горючих веществ, когда площадь горения f непрерывно увеличивается, решение уравнения теплового баланса принимает несколько иной вид:

$$\tau_{\text{кр}} = \left[\frac{W_{\text{пом}} \cdot C \cdot (t_{\text{кр}} - t_{\text{нач}})}{(1 - \varphi) \cdot \pi \cdot Q \cdot n \cdot v^2} \right]^{1/3}, \quad (18)$$

где v – скорость распространения пламени.

Время $\tau_{\text{кр}}$, достаточное для снижения концентрации кислорода на 7 объёмных процентов (от ~21 до ~14), можно рассчитать из уравнения материального баланса по кислороду:

$$\tau_{\text{кр}} = \left[\frac{0,07 \cdot W_{\text{пом}}}{\pi \cdot n \cdot W_{\text{O}_2} \cdot v^2} \right]^{1/3}, \quad (19)$$

где W и $W_{\text{пом}}$ – объём помещения, м³; W_{O_2} – расход кислорода на сгорание 1 кг горючего вещества, м³/кг [из уравнений (2) и (3) или из приложения 10 с учётом концентрации кислорода и избытка воздуха]; C – теплоёмкость воздушной смеси (воздуха), кДж/(кг·К); n – массовая скорость горения, кг/(м²·мин) (приложение 6); Q – теплота сгорания вещества, ккал/кг (приложение 2, или А 27466); v – линейная скорость распространения пламени по поверхности горючего вещества, м/мин (может составлять от 0,3 до 6,0 м/мин); φ – коэффициент теплотерь на нагревание строительных конструкций (принимается, в среднем $\varphi \approx 0,5$);

t_n – начальная температура воздуха в помещении, °С; $t_{кр}$ – критическая температура, принимают $t_{кр} \approx 60$ °С.

Для здания в целом время наступления критической фазы пожара соответствует времени проникновения продуктов горения и возможной потери видимости в коммуникационных помещениях (на путях эвакуации), размещаемых на втором этапе эвакуации. В большинстве случаев существенная потеря видимости может наступать после того, как в помещении возникают критические для человека температуры. При горении волокнистых веществ во взрыхленном состоянии интенсивное горение на поверхности происходит в течение нескольких минут (1–2 мин), после чего начинается тление с интенсивным дымообразованием. При горении твердых изделий из древесины дымообразование и распространение продуктов горения в смежные помещения наблюдаются через 5–6 мин. Так что, если на первом этапе эвакуации (в пределах помещения) решающим фактором для наступления критической фазы пожара является воздействие тепла на организм человека или снижение концентрации кислорода, то на последующих этапах решающими могут оказаться распространение продуктов горения и задымление эвакуационных путей. При этом следует учитывать, что даже незначительное задымление, при котором еще сохраняется удовлетворительная видимость, может оказать отрицательное психологическое воздействие на эвакуирующихся и быть причиной возникновения паники. Исходя из этого время наступления критической фазы развития пожара (т. е. время, в течение которого должна закончиться эвакуация людей из здания) может составлять:

- для производственных и других зданий, где основным горючим являются целлюлозные материалы (древесина), – 5–6 мин;
- для производственных зданий (при наличии в них волокнистых материалов во взрыхленном состоянии и при наличии легковоспламеняющихся и горючих жидкостей) – 1,5–2 мин.

10. АВАРИЙНАЯ ВЕНТИЛЯЦИЯ. ДЫМОВЫЕ ЛЮКИ

При расчете площади сечения дымовых люков исходят из теории аэрации зданий, применительно к которой приток воздуха в помещение и удаление продуктов сгорания при пожаре осуществляются за счет

разности аэростатических давлений. Плоскость равных давлений внутри и снаружи здания принимают (из условия незадымляемости смежных помещений) на уровне высоты дверных проёмов $h_{дв}$, через которые осуществляется приток свежего воздуха. Тогда середина нижних (дверных) проёмов, определяющая их уровень относительно нулевой отметки, будет

$$h_1 = 0,5 h_{дв}, \quad (20)$$

а напор приточного воздуха можно определить условием

$$\Delta P_1 = h_1 (\rho_n - \rho_{n2}) g. \quad (21)$$

Располагая дымовые люки в кровле здания высотой H , определяем их высоту относительно плоскости равных давлений как

$$h_2 = H - h_1. \quad (22)$$

Тогда напор удаляемых продуктов горения через дымовые люки можно рассчитать по формуле

$$\Delta P_2 = h_2 (\rho_n - \rho_{n2}) g. \quad (23)$$

Скорость истечения v продуктов горения через дымовые люки (с учётом их аэродинамического сопротивления) не превысит

$$v = [2 g h_2 \frac{(\rho_n - \rho_{n2})}{\rho_{n2}}]^{0,5}. \quad (24)$$

С учётом характеристики горения материалов, находящихся внутри здания, удельную площадь дымового люка $f_{л}$, приходящуюся на 1 м² площади пола, рассчитывают по формуле

$$f_{л} = \frac{\beta n W_t \alpha_{изб}}{\varphi v}, \quad (25)$$

где n — массовая скорость выгорания вещества, кг/(м²·с); W_t — объём газообразных продуктов, образующихся при сгорании 1 кг вещества с учётом поправки на их температуру, м³/кг; φ — коэффициент расхода (принимают $\varphi \approx 0,6$); $\alpha_{изб}$ — коэффициент избытка воздуха (при горении жидкостей и твёрдых кускообразных материалов принимают $\alpha_{изб} = 2$,

а твёрдых волокнистых материалов – $\alpha_{\text{изб}} = 5$); v – скорость истечения продуктов горения [см. (24)] м/с; β – коэффициент, учитывающий отношение площади горения к площади пола, в закрытых помещениях принимают $\beta = 0,4$.

При определении объёма отходящих продуктов горения W_t их температуру принимают равной:

300 °С – для волокнистых материалов;

450 °С – для изделий из твёрдых материалов;

600 °С – для жидких горючих веществ.

При использовании автоматических средств пожаротушения и/или локализации очагов пожара (спринклерное и дренчерное оборудование) принимают температуру отходящих продуктов горения:

150 °С – для волокнистых материалов;

70–80 °С – для изделий из твёрдых горючих веществ.

Опыты и расчеты показывают, что удовлетворительная работа дымовых люков обеспечивается, если сечение приточных отверстий в 1,5–2 раза больше вытяжных.

11. ЭВАКУАЦИЯ ЛЮДЕЙ ПРИ ЧРЕЗВЫЧАЙНОЙ СИТУАЦИИ

Чтобы спасти людей, необходимо обеспечить их эвакуацию из опасной зоны *раньше, чем наступит критическая фаза* хотя бы по одному из параметров, указанных выше. Для этой цели ещё на стадии проектирования зданий предусматриваются *пути эвакуации*, требования к которым строго регламентированы [3]:

6.9. Выходы являются **эвакуационными**, если они ведут:

а) из помещений **первого** этажа наружу:

- непосредственно;
- через коридор;
- через вестибюль (фойе);
- через лестничную клетку;
- через коридор и вестибюль (фойе);
- через коридор и лестничную клетку;

б) из помещений **любого этажа, кроме первого**:

- непосредственно в лестничную клетку или на лестницу 3-го типа;
- в коридор, ведущий непосредственно в лестничную клетку или на лестницу 3-го типа;
- в холл (фойе), имеющий выход непосредственно в лестничную клетку или на лестницу 3-го типа;

в) в соседнее помещение (кроме помещения класса Ф5 категории А или Б) на том же этаже, обеспеченное выходами, указанными в а и б (выход в помещение категории А или Б допускается считать эвакуационным, если он ведет из технического помещения без постоянных рабочих мест, предназначенного для обслуживания вышеуказанного помещения категории А или Б).

6.13. Не менее двух эвакуационных выходов должны иметь этажи зданий класса:

- Ф1.1; Ф1.2; Ф2.1; Ф2.2; Ф3; Ф4;

- Ф1.3 при общей площади квартир на этаже, а для зданий секционного типа – на этаже секции – более 500 м; при меньшей площади (при одном эвакуационном выходе с этажа) каждая квартира, расположенная на высоте более 15 м, кроме эвакуационного должна иметь аварийный выход по 6.20*; помещения класса Ф1.3, расположенные на двух уровнях, при высоте расположения верхнего этажа более 18 м должны иметь эвакуационные выходы с каждого этажа;

- Ф5 категорий А и Б при численности работающих в наиболее многочисленной смене более 5 чел., категории В – 25 чел.

Не менее двух эвакуационных выходов должны иметь подвальные и цокольные этажи при площади более 300 м или предназначенные для одновременного пребывания более 15 чел.

6.14. Число эвакуационных выходов с этажа должно быть не менее двух, если на нем располагается помещение, которое должно иметь не менее двух эвакуационных выходов. Число эвакуационных выходов из здания должно быть не менее числа эвакуационных выходов с любого этажа здания.

6.15*. При наличии двух эвакуационных выходов и более они должны быть расположены *рассредоточено* (за исключением выходов из коридоров в незадымляемые лестничные клетки). Минимальное расстояние L , м, между наиболее удаленными один от другого эвакуационными выходами следует определять по формулам:

из помещения

$$L \geq 1,5 \cdot P^{0,5}/(n-1);$$

из коридора

$$L \geq 0,33 \cdot D/(n-1),$$

где P – периметр помещения, м; n – число эвакуационных выходов; D – длина коридора, м.

При наличии двух и более эвакуационных выходов общая пропускная способность всех выходов должна обеспечить безопасную эвакуацию всех людей, находящихся в помещении, на этаже или в здании.

6.16. **Высота** эвакуационных выходов (в свету) должна быть не менее **1,9 м**; **ширина** не менее: **1,2 м** – из помещений класса Ф1.1 при числе эвакуирующихся более 15 чел., из помещений и зданий **других** классов функциональной пожарной опасности, за исключением класса Ф1.3, – более 50 чел.; **0,8 м** – во всех остальных случаях.

6.17. **Высота** горизонтальных участков путей эвакуации должна быть не менее чем **2 м**; **ширина** горизонтальных участков путей эвакуации и пандусов не менее:

- **1,2 м** – для общих коридоров, по которым могут эвакуироваться из помещений класса Ф1 более 15 чел., из помещений других классов функциональной пожарной опасности – более 50 чел.;

- **0,7 м** – для проходов к одиночным рабочим местам;

- **1,0 м** – во всех остальных случаях.

В любом случае эвакуационные пути должны быть такой ширины, чтобы по ним можно было беспрепятственно пронести носилки с лежащим на них человеком.

6.18. Ширина марша лестницы, предназначенной для эвакуации людей, включая лестничные клетки, должна быть не менее расчетной и не менее ширины любого эвакуационного выхода (двери) на нее, т. е. не менее:

а) **1,35 м** – для зданий класса Ф1.1;

б) **1,2 м** – для зданий с числом людей, находящихся на любом этаже, кроме первого, более 200 чел.;

в) **0,7 м** – для лестниц, ведущих к одиночным рабочим местам;

г) **0,9 м** – для всех остальных случаев.

6.19. Уклон лестниц на путях эвакуации должен быть не более 1:1; ширина проступи – не менее 25 см, а высота ступени ≤ 22 см.

Уклон открытых лестниц для прохода к одиночным рабочим местам допускается увеличивать до 2:1.

Допустимую нагрузку на путях эвакуации принимают из расчета 167 чел. на 1 м ширины эвакуационных путей и выходов. Суммарная ширина эвакуационных путей и выходов в этом случае определится как $\Sigma\delta = N/167$, где N – расчетное количество эвакуирующихся с этажа, где имеется наибольшее количество людей; $\Sigma\delta$ – суммарная ширина коридоров, дверей, лестничных маршей, м.

Количество людей, находящихся на этажах здания, принимается с учётом функционального предназначения объектов и регламента реализуемого производства [3].

Меры пожарной безопасности в отношении обеспечения эвакуации людей можно считать предусмотренными в проекте, если:

1) наибольшее фактическое расстояние l_{ϕ} от места пребывания человека или от двери наиболее удаленного помещения *по эвакуационным путям* до ближайшего эвакуационного выхода не превышает нормативной протяженности путей эвакуации l_n , т. е. $l_{\phi} \leq l_n$;

2) суммарная ширина эвакуационных выходов и лестниц $\Sigma\delta_{\phi}$, предусмотренная проектом, не меньше требуемой по нормам ширины $\Sigma\delta_n$ (ширины, определенной по пропускной их способности):

$$\Sigma\delta_{\phi} \geq \Sigma\delta_n;$$

3) в проекте предусмотрено не менее двух эвакуационных выходов и лестниц, а отступление от этого требования обосновано нормами;

4) в проекте предусмотрены необходимые конструктивные мероприятия, снижающие возможность задымления путей эвакуации и обеспечивающие организованное и безопасное движение людей.

12. РАСЧЕТ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ ЭВАКУАЦИИ

Продолжительность эвакуации на первом и втором этапах определяют по протяженности путей эвакуации и пропускной способности дверей и лестниц. При расчете принимают, что плотности потоков на путях эвакуации равномерны и достигают максимальных значений.

Скорость движения, как показали практические наблюдения, на горизонтальных участках пути колеблется в пределах **15–17 м/мин**. Нормами проектирования для помещений с массовым пребыванием людей скорость движения принимается равной **16 м/мин**. Скорость движения при предельных плотностях потоков по лестнице вниз принимается равной **10 м/мин**, а по лестнице вверх – **8 м/мин**.

Удельная пропускная способность выходов (подразумевается количество людей, проходящих через 1 м выхода за 1 мин) принимается:

для дверей и лестниц шириной до 1,5 м – **50 чел/(м·мин)**;

при ширине более 1,5 м – **60 чел/(м·мин)**.

Продолжительность эвакуации людей на первом этапе τ_p' определяется временем перемещения наиболее удаленного эвакуирующегося l_{ϕ} до ближайшего выхода:

$$\tau_p' = \frac{l_\phi}{v}. \quad (26)$$

За это же время τ_p' все N человек, находившихся в помещении, должны успеть преодолеть дверной проём (шириной δ м и пропускной способностью q_0 чел./м·мин), которым заканчивается первый этап эвакуации:

$$\tau_p' = \frac{N}{\delta q_0}. \quad (27)$$

Продолжительность первого этапа эвакуации τ_p' не должна превышать время наступления критической фазы τ_{don}' в покидаемом помещении:

$$\tau_p' \leq \tau_{don}'. \quad (28)$$

Общая продолжительность эвакуации τ_p'' (мин) с учётом времени преодоления последующих этапов (l_1, l_2, l_3) определяется как время, затрачиваемое на первый этап эвакуации τ_p' , плюс время, необходимое для движения *наиболее удалённого эвакуирующегося* к наружным дверям здания:

$$\tau_p'' = \tau_p' + \frac{l_1}{v_1} + \frac{l_2}{v_2} + \frac{l_3}{v_1} \leq \tau_{don}'', \quad (29)$$

где l_1 – наибольшее расстояние от выхода в коридор или балкона до ближайшей лестницы, м; l_2 – длина пути по лестнице, принимаемая равной её утроенной высоте, м; v_1 – скорость движения по горизонтали, м/мин; l_3 – длина пути от лестницы до наружных выходов, м; v_2 – скорость движения по лестнице, м/мин.

Продолжительность эвакуации по пропускной способности наружных дверей определяется по формуле

$$\tau_p'' = \frac{N}{\delta q_0} + \tau_0 \leq \tau_{don}'', \quad (30)$$

где N – общее количество эвакуирующихся; δ – суммарная ширина наружных дверей, м; τ_0 – время до начала эвакуации через наружные двери, мин.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение 1

Минимальные взрывоопасные концентрации некоторых смесей пыли с воздухом (во взвешенном состоянии) [7 – 10]

Наименование	Нижний предел взрываемости, г/м ³	Температура самовоспламенения, °С	
		Аэрогель	Аэрозоль
Алюминий	40		550
Аминопласт	52		752
Антрацен	5		505
Декстрин	38		400
Древесная мука	11		430
Казеин	45		520
Канифоль	13		325
Крахмал	40		430
Лигрин	30		775
Магний	10		470
Метальдегид	29		513
Нафталин	2,5		575
Полипропилен	13		890
Полиэтилен	15		450
Мука пробковая	15		460
Мука пшеничная	7,6		410
Мука ржаная		245	650
Мука кровавая	7,6		
Мука мясокостная	10,1		
Пыль резиновая	10		1000
Пыль табачная		205	988
Пыль чайная		220	925
Пыль древесная		275	775
Пыль сланцевая	53	225	830
Пыль каменноугольная	35	260	969
Сахар	9		360
Сахарная пудра	6,5		

Окончание

Наименование	Нижний предел взрываемости, г/м ³	Температура самовоспламенения, °С	
		Аэрогель	Аэрозоль
Сера	2,3		235
Стекло органическое	13		579
Титан	45		330
Фенольная смола	25		460
Фенопласт	37		491
Эбонит	7,6		360
Молоко сухое	7,6		
Молоко сухое обезжиренное	8,9		
Сливки сухие с сахаром	6,3		

Приложение 2

**Основные свойства взрывоопасных паров ЛВЖ
и горючих газов [7 – 10]**

Наименование	Молекулярная масса	Температура, °С		Пределы взрываемости, %		Плотность по воздуху	ПДК, г/м ³
		вспышки	самовоспламенения	нижний	верхний		
Акролеин	56,0	– 26	234	2,8		1,9	0,0007
Амилацетат	130,1	25	360	1,0		4,5	0,1
Ацетальдегид	44,0	– 38	158	4,0		1,6	0,05
Ацетон	58,0	– 18	465	2,2	12,8	2,0	0,2
Бензин Б-95	100,0	– 37	380	0,98		–	0,1
Бензин Б-100	100,0	– 34	474	0,98		3	0,1
Бензин А-66	100,0	– 39	255	0,76	5,4	–	0,1
Бензин А-74	100,0	– 36	300	0,79		–	0,1
Бензин «калоша»	100,0	– 17	350	1,1		–	0,1

Продолжение

Наименование	Молекулярная масса	Температура, °С		Пределы взрываемости, %		Плотность по воздуху	ПДК, г/м ³
		вспышки	самовоспламенения	нижний	верхний		
Бензол	78,1	– 11	534	1,41	6,75	2,7	0,02
Бромбензол	157,0	30	545	0,5		5,4	0,003
Бутилакрилат	128,0	38	280	1,0		4,4	–
Бутиламин	73,1	– 12	312	1,7		2,6	–
Бутилацетат	116,2	29	450	2,2		40	0,2
Бутанол	74,0	34	410	2,27		2,6	0,1
Дихлорэтан	99,0	9	413	6,2		3,4	0,1
Древесный спирт	2,0	8	464	6,0		1,1	–
Изобутанол	74,1	28	390	1,8		2,6	–
Изонропанол	60,1	14	400	2,0		2,1	–
Керосин ТС-1	—	27	250	1,1–1,4	7,0	–	0,3
Ксилол	106,2	29	580	1,1		3,7	0,05
Лигроин	–	10	380	1,4		–	0,3
Метанол	32,0	8	464	6,72	36,5	1,1	0,005
Метилацетат	74,1	– 15	470	3,6		2,5	0,1
Метилакрилат	86,1	– 15	465	1,23		2,9	–
Метилстирол	118,0	38	540	0,85		4,1	–
Метилэтилкетон	72,1	– 6	514	1,9		2,5	0,2
Нитрометан	61,0	35	418	7,3		1,9	0,03
Пропанол	60,1	23	371	2,02		2,1	0,01
Растворители:							
№ 646	–	–7	403	1,9		–	–
№ 647	–	5	424	1,6		–	–

Продолжение

Наименование	Молекулярная масса	Температура, °С		Пределы взрываемости, %		Плотность по воздуху	ПДК, г/м ³
		вспышки	самовоспламенения	нижний	верхний		
№ 648	–	13	388	1,7		–	–
№ 649		25	383	1,8		–	–
№ 651	–	29	247	–		–	–
<i>P4</i>		–7	550	1,7		–	–
P 5		–1	497	1,8		–	–
P 40		–	415	1,5		–	–
РДВ		2	424	1,8		–	–
РКБ -1	–	25	376	1,5		–	–
РКБ - 2	–	34	346	1,8		–	–
<i>PC - I</i>	–	9	490	1,4		–	–
Скипидар	136,0	34	300	0,8		4,7	0,3
Сольвент	–	36	540	1,3		–	0,1
Сольвент-нафта		34	520	1,3		2	0,1
Стирол	104,1	30	530	1,1		3,6	0,005
Толуол	92,1	4	536	1,27	6,75	3,2	0,05
Триэтиламин	101,2	–12	510	1,6		5,1	0,01
Уайт-спирит	–	33	227	1,4		–	0,3
Уксусная кислота	60,0	38	454	3,3		2,1	0,005
Циклогексан	84,2	– 18	260	1,2		2,9	0,08
Циклогексанон	98,1	40	495	0,92		3,4	0,01
Этилакрилат	100,1	4	385	1,1		–	–
Этиламин	45,1	–39	555	5,5		1,6	–

Продолжение

Наименование	Молекулярная масса	Температура, °С		Пределы взрываемости, %		Плотность по воздуху	ПДК, г/м ³
		вспышки	самовоспламенения	нижний	верхний		
Этилацетат	88,1	2	400	3,55		3,03	0,2
Этанол	46,1	13	365	3,28	18,95	1,6	1,0
Этилцеллозол	91,1	40	215	1,8		3,1	–
Газы:							
аммиак	17,0		650	15,5	27,0	0,6	0,02
ацетилен	26,0	–	335	2,5	80,0	0,91	0,5
Н-бутан	58,1	–	405	1,86	8,41	2,1	–
бутилен	56,1	–	384	1,6		–	–
винил хлористый	62,5	–	545	3,6		2,2	–
водород-	2,0	–	510	4,0	74,2	0,07	–
изобутан	58,1	–	462	1,8		2,1	–
метан	16,0	–	537	5,0		0,55	–
метил хлористый	50,0	–	632	7,6		1,7	–
окись углерода	28,0		610	12,5		0,97	0,02
окись этилена	44	–	429	3,0	80,00	1,5	–
природный газ	16	–	537	4,5		0,55	–
пропан	44,1	–	466	2,1		1,6	–
пропилен	42,1	–	410	2,2		1,5	–
псевдо-бутилен	56,1	–	324	1,8		2,0	–
сероводород	34,1	–	246	4,3		1,2	0,01

Окончание

Наименование	Молекулярная масса	Температура, °С		Пределы взрываемости, %		Плотность по воздуху	ПДК, г/м ³
		вспышки	самовоспламенения	нижний	верхний		
сероокись углерода	60,1	–	–	11,9		2,1	0,01
триметил-амин	59,1	–	190	2,0		2,1	0,005
трифторхлор-этилен	116,5	–	600	28,5		4,0	–
трифтор-этилен	82,0	–	–	15,3		3,7	–
циклопропан	42,1	–	498	2,4		1,6	–
этан	30,1	–	472	2,9		1,1	–
этилен	28,0	–	640	3,0		0,97	–

Приложение 3

Температурные пределы воспламенения жидкостей (°С)

Жидкость	Пределы		Жидкость	Пределы	
	нижний	верхний		нижний	верхний
Ацетон	–20	+ 6	Масло соляровое	+ 116	+ 147
Бензол	–14	+ 12	Масло трансформаторное	+ 122	+ 168
Бензин А-74	–35	– 7	Спирт этиловый	+ 11	+ 40
Керосин тракторный	+ 4	+ 35	Скипидар	+ 32	+ 53

Расход воздуха на горение различных веществ и материалов [7 – 9]

Горючее вещество	Количество воздуха, необходимое для сгорания 1 кг вещества		Горючее вещество	Количество воздуха, необходимое для сгорания 1 кг вещества	
	кг	м ³		кг	м ³
Ацетон	9,45	7,35	Ацетилен	15,4	11,9
Бензол	13,2	10,25	Бутан	39,8	30,94
Бензин	15,0	11,1	Водород	3,0	2,38
Древесина W=7%	5,9	4,18	Водяной газ	2,86	2,22
Керосин	14,8	11,5	Метан	12,3	9,52
Толуол	13,3	10,3	Пропан	30,6	23,8

Объём продуктов сгорания некоторых веществ при $\alpha = 1$ [7]

Горючее вещество	Влажность, %	Объём продуктов сгорания, м ³ /кг	Горючее вещество	Влажность, %	Объём продуктов сгорания, м ³ /кг
Ацетон		8,14	Керосин		12,30
Бензин		12,60	Мазут		11,35
Бумага	12	4,20	Торф	11	5,18
Древесина	20	4,40	Хлопок	4,5	4,52
– " –	7	4,90	Этанол	–	7,76
Каучук СК-С	1	10,80			

Массовая скорость выгорания твёрдых материалов [7]

Твёрдое вещество	Скорость выгорания, кг/(м ² · мин)	Твёрдое вещество	Скорость выгорания, кг/(м ² · мин)
Бумага разрыхлённая	0,48	Каучук натуральный	0,8
Древесина в изделиях W = 8÷10 %	0,84	Горф W = 40 % в караванах	0,18
Оргстекло	0,86	Каучук СКИ-3	1,17
Полистирол	0,86	Хлопок разрыхлённый	0,24
Резино-технические изделия	0,67	Штапельное волокно разрыхлённое	0,4

Скорость выгорания горючих и легковоспламеняющихся жидкостей [7]

Жидкость	Скорость выгорания		Жидкость	Скорость выгорания	
	мм/мин	кг/(м ² · мин)		мм/мин	кг/(м ² · мин)
Ацетон	3,3	2,83	Мазут	1,41	1,3
Бензол	3,15	2,3	Нефть	1,6	1,2
Бензин	3,8–4,5	2,7–3,2	Этанол	2,6	1,6–2
Керосин	3,6	2,9			

Скорость распространения пламени в газовых смесях [7]

Горючие вещества и их смеси с воздухом или кислородом	Эквимольное содержание газа (% об.)	U , см/с	Содержание газа в смеси (% об.) при U макс	U_{max} , см/с
Водород (H_2)	29,5	160	42,0	267
Оксид углерода (CO)	29,5	30	43,0	41,5
Метан (CH_4)	9,5	34	10,5	37
Ацетилен C_2H_2	7,7	100	10,0	135
Этилен (C_2H_4).	6,5	60	7,0	63
Углевоздушная смесь				0,3–0,5
H_2 + воздух				2,8
H_2 + O_2				13,8
C_2H_2 + O_2				15,4

Скорость распространения огня по поверхности жидкостей и твёрдых материалов [7, 8]

Скорость распространения огня по поверхности	U , м/мин	Примечание
Сгораемые покрытия в зданиях	1–3	
Текстильные изделия	0,3–0,4	
Бумага в рулонах	0,3	
Синтетический каучук	0,4	
Древесина	1–3 0,5 – 1,5 10 – 24	По горизонтали Вертикально вниз Вертикально вверх
Ацетон	19	
Толуол	10,2–50,4	
Этанол	7,8–22,8	

Скорость выгорания материалов [10]

Материал	Средняя скорость выгорания n_{cp} , кг/(м ² · с)	Теплота сгорания, Q^p_n , МДж/кг
Древесина (бруски, мебель)	0,015	13,8
Волокно штапельное	0,0067	13,8
Каучук натуральный	0,0133	44,725
Каучук синтетический	0,00883	45,25
Каучук СКИ-3	0,0195	45,145
Киноплёнка целлулоидная	1,2	15,05
Книги на стеллажах	0,0055	13,4
Резинотехнические изделия	0,0112	33,4
Стекло органическое	0,016	27,67
Полистирол	0,0143	38,97
Текстолит	0,0067	30,3

Скорость распространения пламени по конструкциям

Объект	Скорость распространения пламени, 10 ⁻² м/с [10]
Административные здания	1,7–2,5
Больницы (зд. II степени огнестойкости)	1–1,5
Жилые дома (зд. III степени огнестойкости)	0,83–1,33
Волокнистые материалы (взрыхлённые)	8,3–13,3
Древесина (доски толщиной 2–4 см в штабелях) при влажности, %:	
8–14	5,00–6,67
15–20	3,83–2,67
21–30	2,0–1,7

Объект	Скорость распространения пламени, 10^{-2} м/с [10]
Лесопильные цехи:	
здания III степени огнестойкости	1,7–5,0
здания V степени огнестойкости	3,33–8,33
Резинотехнические изделия (штабеля на открытой площадке)	1,7–2,0
Склады:	
бумаги в рулонах	0,33–0,50
круглого леса в штабелях	1,0–1,7
каучука синтетического	1,0–1,7
льноволокна	5–9,17
Сгораемые покрытия больших площадей	2,83–5,33
Театры (сценические части)	1,67–5
Холодильники	0,83–1,33
Цехи:	
текстильного производства	0,5–1,33
деревообрабатывающего комбината (здания III степени огнестойкости)	1,7–2,67

Время протекания процессов горения в кинетической области

Для газоздушных смесей ~ 0,2 с.

Для паровоздушных смесей ~ 0,3 с.

Для пылевоздушных смесей ~ 0,4 – 0,5 с.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Нормы пожарной безопасности. НПБ 105–2003. Определение категорий помещений и зданий взрывопожарной и пожарной опасности. – М., 2013.
2. Правила устройства электроустановок. – М.: Энергоатомиздат, 1986.
3. СНиП 21-01–97. Пожарная безопасность зданий и сооружений (с изменениями № 1, 2). – М.: ГУП ЦПП, 2002 (допущен в 2013 г.).
4. ГН 2.2.5.1313–03. ПДК вредных веществ в воздухе рабочей зоны. – М., 2003.
5. СанПиН 2.2.4.542–96. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений. – М., 1996.
6. **Евдокимов А.А.** Безопасность жизнедеятельности: Примеры расчётов: Пособие. – СПб.: СПбГУНиПТ, 2007. – 72 с.
7. Основы пожарной безопасности: Учеб. пособие для высших учебных заведений / Под ред. М.В. Алексева. – М.: Высш. шк., 1971. – 248 с.
8. **Белов С.В.** Безопасность жизнедеятельности и защита окружающей среды (техносферная безопасность): Учеб. для бакалавров. 3-е изд. – М.: Изд. Юрайт. ИД Юрайт, 2012. – 682 с.
9. **Зайцев А.М., Кисс В.В., Сергиенко О.И.** Пожарная безопасность на пищевых производствах: Учеб. пособие. – СПб., 2000.
10. ГОСТ 12.1.004–85. ССБТ. Пожарная безопасность. – М.: Изд-во стандартов, 1985.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ. ЧТО НЕОБХОДИМО ЗНАТЬ О ГОРЕНИИ.....	3
1. ПРОБЛЕМЫ ПОЖАРНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ.....	4
2. УСЛОВИЯ ПОЯВЛЕНИЯ ОГНЯ И ПРИНЦИПЫ ЕГО ПРОФИЛАКТИКИ.....	5
3. ПОЖАРНАЯ ОПАСНОСТЬ ВЕЩЕСТВ КЛАССИФИКАЦИЯ ПОМЕЩЕНИЙ И ЗОН	6
4. ХИМИЗМ ПРОЦЕССА ГОРЕНИЯ.....	10
5. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ВЗРЫВА	11
6. ОПАСНОСТИ, СОПРОВОЖДАЮЩИЕ ПОЖАРЫ И ВЗРЫВЫ....	15
7. ЛОКАЛИЗАЦИЯ ПОЖАРОВ	17
8. ЗАЩИТА ЗДАНИЙ ОТ РАЗРУШЕНИЯ ПРИ ВЗРЫВЕ ВЗРЫВНЫЕ КЛАПАНЫ.....	18
9. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВРЕМЕНИ НАСТУПЛЕНИЯ КРИТИЧЕСКОЙ ФАЗЫ.....	18
10. АВАРИЙНАЯ ВЕНТИЛЯЦИЯ. ДЫМОВЫЕ ЛЮКИ.....	20
11. ЭВАКУАЦИЯ ЛЮДЕЙ ПРИ ЧРЕЗВЫЧАЙНОЙ СИТУАЦИИ....	22
12. РАСЧЕТ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ ЭВАКУАЦИИ	25
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	27
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	38

Евдокимов Александр Александрович
Кисс Валерий Вячеславович

ПРОЦЕССЫ ГОРЕНИЯ И ВЗРЫВА

Учебно-методическое пособие

Ответственный редактор
Т.Г. Смирнова

Титульный редактор
Е.О. Трусова

Компьютерная верстка
Н.В. Гуральник

Дизайн обложки
Н.А. Потехина

Печатается
в авторской редакции

Подписано в печать 26.12.2016. Формат 60×84 1/16
Усл. печ. л. 2,33. Печ. л. 2,5. Уч.-изд. л. 2,25
Тираж 100 экз. Заказ № С 68

Университет ИТМО. 197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49

Издательско-информационный комплекс
191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9