

В.А. Девисилов, Т.И. Дроздова,
С.С. Тимофеева

Теория горения и взрыва



В.А. Девисилов, Т.И. Дроздова,
С.С. Тимофеева

ТЕОРИЯ ГОРЕНИЯ И ВЗРЫВА

ПРАКТИКУМ

Под общей редакцией В.А. Девисилова

*Рекомендовано Учебно-методическим объединением вузов
по университетскому политехническому образованию
в качестве учебного пособия для студентов высших
учебных заведений, обучающихся по направлению
«Техносферная безопасность»*



МОСКВА
2012

УДК 331.4(075.8)

ББК 65.247я73

Д25

Рецензенты:

доктор технических наук, профессор *Б.Н. Рахманов*
(Московский государственный университет путей сообщения);

доктор химических наук, профессор *А.И. Скушникова*
(Иркутский государственный университет путей сообщения);

доктор химических наук, профессор *Л.В. Каницкая*
(Иркутский государственный технический университет)

Д25 **Девисилов В.А., Дроздова Т.И., Тимофеева С.С.**

Теория горения и взрыва : практикум : учебное пособие / В.А. Девисилов, Т.И. Дроздова, С.С. Тимофеева / под общ. ред. В.А. Девисилова. — М. : ФОРУМ, 2012. — 352 с. — (Высшее образование).

ISBN 978-5-91134-555-6

Рассмотрены явления, возникающие при горении и взрыве. Представлены практические работы по расчету материального и теплового баланса, температурных параметров и критических условий при горении горючих смесей, а также расчеты основных параметров взрыва. Материал пособия иллюстрирован графиками, схемами и дополнен справочными данными.

Пособие предназначено для студентов технических вузов, изучающих дисциплину «Теория горения и взрыва» и обучающихся по направлению «Техносферная безопасность», рекомендовано для студентов технических специальностей, а также бакалавров и учащихся колледжей. Практикум может быть полезен для практических работников служб охраны труда, промышленной безопасности и отделов ГО и ЧС предприятий.

УДК 331.4(075.8)

ББК 65.247я73

ISBN 978-5-91134-555-6

© Девисилов В.А., Дроздова Т.И.,
Тимофеева С.С., 2011

© Издательство «ФОРУМ», 2011

Предисловие

В настоящее время проблемы национальной безопасности и промышленной безопасности, защиты населения от чрезвычайных ситуаций становятся все более актуальными. Реальную угрозу представляют крупные промышленные предприятия, нефтепроводы, газовые магистрали, на которых наблюдается устойчивая тенденция роста числа аварийных ситуаций, связанных с пожарами и взрывами. В последние годы участились аварии на шахтах, приводящие к человеческим жертвам и значительным материальным потерям. Из-за неисправностей оборудования, транспортных средств, а также из-за действий человека растет число аварий на авиационном, железнодорожном, автомобильном транспорте. Наибольшую опасность представляют аварии с выбросом химически опасных и радиоактивных веществ, разливом нефтепродуктов, разрушением оборудования с опасными веществами и работающих под высоким давлением.

В Российской Федерации разработано множество нормативных документов для обеспечения безаварийной эксплуатации технологического оборудования, соблюдения правил пожарной безопасности. Однако для предотвращения чрезвычайных ситуаций, для борьбы с пожарами и взрывами требуется совершенствование профилактической работы, организация которой требует теоретических знаний основных физико-химических аспектов горения и взрыва.

Современному специалисту, обучающемуся по направлению «Техносферная безопасность», необходимо знать потенциальные пожаро- и взрывоопасные ситуации на предприятиях, владеть методами их предотвращения.

Предлагаемое учебное пособие призвано сформировать у студентов представление о характере процессов горения и взрыва, умение предвидеть и предотвращать опасные явления, приводящие к пожарам, взрывам.

В пособии представлены практические работы, предназначенные для формирования у студентов практических навыков по расчету ос-

новых параметров горения и взрыва. Пособие дополнено большим количеством справочных данных по физико-химическим параметрам горючих веществ и материалов.

Дисциплина «Теория горения и взрыва» является дисциплиной федерального компонента государственных образовательных стандартов по направлению «Техносферная безопасность». В пособии представлены основы теории и методы расчетов основных параметров горения и взрыва.

Будем признательны всем читателям за замечания и предложения, которые следует направлять в издательство на имя авторов.

Раздел 1

ГОРЕНИЕ

Горением называется физико-химический процесс, при котором горючие вещества под воздействием высоких температур вступают в химическое взаимодействие с окислителем, превращаясь в продукты горения.

Горение сопровождается интенсивным выделением теплоты и световым излучением.

По этим признакам горение можно отличить от других явлений. Например, горение электрической лампочки нельзя назвать горением, хотя при этом выделяется теплота и излучается свет. В этом явлении нет одного из главных признаков горения — химической реакции, приводящей к выделению огромного количества теплоты с последующим образованием пламени.

Горение в большинстве случаев сложный химический процесс, состоящий из реакций окислительно-восстановительного типа. Для возникновения горения необходимы определенные условия.

1.1. Условия для возникновения горения

Для возникновения, развития и распространения процесса горения и его длительного существования необходимо выполнение определенных условий, без которых этот процесс невозможен.

Для возникновения горения необходимы:

- наличие горючей смеси, т. е. определенное сочетание горючего вещества с окислителем (обычно кислородом воздуха);
- инициация реакции между горючим веществом и окислителем.

Основными факторами, определяющими возникновение реакции между горючим веществом и окислителем, являются:

- нагревание горючей смеси до температуры самовоспламенения или самовозгорания;
- воздействие внешнего источника зажигания (ИЗ).

При возникновении горения в случае нагревания горючей смеси до температуры самовоспламенения или самовозгорания процесс горения осуществляется в режиме самовоспламенения (самовозгорания). При возникновении горения от источника зажигания происходит вынужденное воспламенение или вынужденное зажигание горючей смеси.

Основными условиями вынужденного зажигания являются:

- наличие горючего вещества или горючей смеси веществ;
- наличие окислителя;
- наличие источника зажигания, под воздействием которого начинается протекание химических реакций горения между компонентами горючей смеси.

1.1.1. Горючее вещество

Горючее вещество — это вещество, способное к горению. Горючие вещества характеризуются *горючестью*.

Горючесть — это способность вещества или материала к распространению пламенного горения или тления.

Горючесть веществ характеризуется физико-химическими свойствами, агрегатным состоянием, особенностями загорания и горения.

Способность к горению определяется основными показателями, приведенными в табл. 1.1, набор которых зависит от агрегатного состояния и условий процесса горения.

По горючести вещества или материалы подразделяются на три группы:

- негорючие (несгораемые);
- трудногорючие (трудносгораемые);
- горючие (сгораемые).

Негорючие вещества не могут гореть на воздухе (металлы, их сплавы, керамические материалы и др.).

Трудногорючие вещества и материалы могут загораться на воздухе от источника зажигания, но не способны самостоятельно гореть после его удаления. К таким веществам относятся полихлорвиниловая

Таблица 1.1. Основные показатели пожаро-, взрывоопасности

Показатель	Агрегатное состояние веществ			
	твердое	жидкое	газы	пыли
Группа горючести	+	+	+	+
Температура				
тления	+	—	—	+
вспышки	—	+	—	—
воспламенения	+	+	—	+
самовоспламенения	+	+	+	+
самовозгорания	+	—	—	+
Концентрационные пределы распространения пламени (нижний и верхний)	—	+	+	+
Температурные пределы распространения пламени	—	+	+	—
Скорость выгорания	—	+	—	—
Коэффициент дымообразования	+	—	—	—
Способность взрываться и гореть при взаимодействии с водой, кислородом воздуха и другими веществами	+	+	+	+

Примечание. Знак «+» означает применяемость, знак «—» — неприменяемость показателя.

плитка, фенолформальдегидный стеклопластик, древесина, подвергнутая поверхностной огнезащитной обработке и др.

Горючие вещества и материалы способны самовозгораться или возгораться от источника зажигания и самостоятельно гореть после его удаления (древесина, торф, уголь, нефтепродукты, органические химические вещества и пр.)

Горючее вещество и окислитель образуют горючую смесь — **горючую систему**.

Горючие вещества или системы могут быть **химически однородными** и **химически неоднородными**.

Химически однородные горючие системы — это смеси горючих газов, паров или пылей с воздухом, в которых равномерно перемешаны горючее вещество и воздух. Горение таких горючих смесей называется **гомогенным**.

Химически неоднородные горючие системы — это системы, в которых горючее вещество и воздух не перемешаны и имеют границу раздела фаз. Чаще всего химически неоднородные системы — это твердые вещества. Однако такими системами могут быть и жидкости, находящиеся в воздухе, струи горючих газов и паров, поступающие в воздух. Горение таких веществ называется *гетерогенным*.

Свойства некоторых горючих веществ приведены в табл. 1—4 прил. III.

Горючие вещества представляют собой сложные химические соединения. Элементный химический состав горючего вещества включает углерод (С), водород (Н), серу (S), а также кислород (О), азот (N). Кроме того, в смеси горючих веществ (например, в нефти, мазуте и др.) могут присутствовать минеральные примеси, превращающиеся при сжигании в золу (А) и влагу (W).

Горючая смесь сложного состава, используемая для сжигания с целью получения теплоты, называется *топливом*. В общем виде элементный химический состав топлив может быть представлен следующим образом:

$$C^p + H^p + O^p + N^p + S^p + A^p + W^p = 100 \%,$$

где индекс р означает рабочую массу топлива (%), поступающего к потребителю. Например, рабочая масса древесины имеет состав: 49 % С, 6 % Н, 43 % О и 2 % других примесей, включая влагу.

Важное значение имеет содержание в составе топлив золы (А) и влаги (W), так как эти составляющие определяют качество и теплотехнические характеристики топлив. Для сравнительной теплотехнической оценки топлив ввели условные понятия *сухой, горючей и органической масс топлив*. Содержание сухой, горючей, органической масс выражается в процентах (%) и обозначается соответственно индексами «с», «г», «о» вместо рабочей массы «р».

Сухое горючее вещество не содержит влаги, и такое топливо называется *обезвоженным*. Элементный состав сухого горючего топлива записывается с индексом «с» следующим выражением:

$$C^c + H^c + O^c + N^c + S^c + A^c = 100 \%.$$

Топливо, которое содержит влагу либо приобретает влагу при хранении, транспортировке, называется *воздушно-сухим*, и состав такого топлива записывается с индексом «а»:

$$C^a + H^a + O^a + N^a + S^a + A^a + W^a = 100 \%.$$

Безводная и беззольная масса топлив называется *горючей*, и состав ее отмечается индексом «Г»:

$$C^Г + H^Г + O^Г + N^Г + S^Г = 100 \%$$

Топлива с органической массой — это особый вид топлив, в которых присутствует сера в виде органических соединений и отсутствует сера в неорганической форме (например, нет примесей серного колчедана). Уравнение таких топлив записываются с индексом «О», указывающим на органическую массу:

$$C^O + H^O + O^O + N^O + S^O = 100 \%$$

Расчет содержания в топливе сухой, горючей, органической или воздушно-сухой массы определяет качество топлива и его горючесть. Такие характеристики топлива представляют значительный интерес для теплоэнергетиков.

1.1.2. Окислители

Горение — сложный химический процесс, состоящий из окислительно-восстановительных химических реакций. В качестве окислителей могут выступать не только кислород или воздух, но и множество других соединений: хлор, бром, сера, марганцевокислый калий, различные перекиси и другие кислородосодержащие вещества. Однако на практике чаще всего горение протекает в атмосфере воздуха.

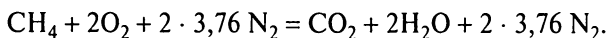
Воздух представляет собой смесь газов, основными компонентами которого являются: азот — 78,084 %; кислород — 20,948 %, аргон — 0,934 %. В незначительных количествах присутствуют неон, гелий, криптон, аммиак, диоксиды углерода и серы и др. Аргон, содержащийся в воздухе, является инертным газом и в процессе горения участия не принимает. Азот также не участвует в *химическом* взаимодействии с горючим веществом. Однако азот оказывает существенное влияние на скорость протекания процесса горения. Присутствие азота следует учитывать, так как он участвует во многих *физических процессах*, сопровождающих горение: участвует в диффузии воздуха в горючее вещество; выступает в качестве инертного разбавителя горючего и окислителя (кислорода); влияет на скорость нагревания и скорость горения горючей смеси.

При составлении уравнения реакции горения вещества в воздухе необходимо учитывать присутствие азота следующим образом: горючее вещество и участвующий в горении воздух пишутся в левой части

уравнения, а после знака равенства — образующиеся продукты реакции. На примере горения метана (природного газа) составим уравнение горения. Для простоты расчетов принимаем, что воздух состоит из 21 % кислорода и 79 % азота с другими инертными газами, т. е. на один объем кислорода приходится $79 : 21 = 3,76$ объема азота, или на каждую молекулу кислорода приходится 3,76 молекулы азота.

Таким образом, состав воздуха может быть представлен следующим выражением: $O_2 + 3,76N_2$.

Исходя из этого выражения, уравнение горения природного газа с учетом коэффициентов перед формулами будет иметь следующий вид:



Кроме продуктов сгорания: углекислого газа и воды, остается 3,76 молекулы азота. Азот воздуха в процессе горения участия не принимает, он целиком переходит в продукты сгорания.

1.1.3. Источники воспламенения (зажигания)

Для возникновения горения горючее вещество и окислитель должны быть нагреты до определенной температуры источником теплоты, источником воспламенения или зажигания.

Источник зажигания (воспламенения) — это любой источник теплоты, способный нагреть горючее вещество до определенной температуры (температуры воспламенения или самовоспламенения).

Наиболее распространенными источниками зажигания являются:

- искры различного происхождения: появляющиеся при неисправности электрооборудования; при соударении металлических тел, при сварке, кузнечных работах и т. д.;
- нагретые тела;
- теплота, возникающая в результате трения;
- аппараты огневого действия;
- искровые заряды статического электричества;
- теплота адиабатического сжатия;
- перегрев электрических контактов;
- химические реакции, протекающие с выделением теплоты;
- пламя и др.

1.2. Полное и неполное горение

При горении веществ и материалов образуются продукты сгорания. Состав продуктов сгорания зависит от состава горючего вещества и условий протекания горения.

Горение может быть *полным* и *неполным*. В том случае, когда в зону горения окислительная среда поступает в количестве, достаточном для полного окисления компонентов горючего вещества, образуются продукты полного сгорания. При полном сгорании веществ образуются продукты, не способные к дальнейшему горению: *диоксид углерода, вода, азот, сернистый ангидрид*.

В условиях пожара окислительной средой является воздух. Поэтому в состав продуктов сгорания будет входить азот, поступающий в зону горения вместе с кислородом воздуха. В том случае когда в зону горения поступает воздуха больше, чем требуется по стехиометрии реакции, в состав продуктов сгорания будет входить и избыток кислорода. Полное сгорание на практике происходит *при избытке кислорода*. В табл. 5 (прил. III) представлены количество и состав продуктов сгорания некоторых горючих углеводородов.

Если в зону горения поступает воздуха меньше, чем требуется по стехиометрии реакции горения, или когда горение осуществляется при низкой температуре, кроме продуктов полного сгорания, образуются продукты неполного сгорания. При неполном сгорании горючих веществ образующиеся продукты способны к дальнейшему горению. Продуктами неполного сгорания являются *оксид углерода (угарный газ), сажа, продукты термоокислительной деструкции спиртов, кетонов и других органических соединений*. Неполное сгорание горючих веществ, происходит *при недостатке кислорода*.

Состав продуктов термоокислительной деструкции зависит от природы горючего вещества, температуры и условий взаимодействия горючей смеси с окислителем. Если в состав горючего вещества входят С, Н, О, Cl, N, то ими являются углеводороды, диоксины, (хлорсодержащие органические соединения), синильная кислота, спирты, альдегиды, кислоты, оксиды азота и т. п. При сгорании древесины, например, образуется более 200 компонентов продуктов сгорания, а при сгорании поливинилхлорида (полимер ПВХ) образуется более 75 различных компонентов.

Если сгорают неорганические вещества, в составе которых есть Р (фосфор), Na (натрий), К (калий), Са (кальций), Al (алюминий), Mg (магний), то продуктами сгорания будут оксиды этих веществ, нахо-

дящиеся в твердом состоянии: P_2O_5 , Na_2O , K_2O , CaO , MgO , Al_2O_3 . Эти продукты сгорания находятся в воздухе в дисперсном состоянии в виде плотного дыма. Признаком неполного сгорания вещества органического состава также является наличие дыма, содержащего негоревшие частички углерода.

Дым представляет собой дисперсную систему, состоящую из мельчайших твердых частиц, взвешенных в смесях продуктов сгорания с воздухом. Диаметр частиц дыма колеблется от 10^{-4} до 10^{-6} см (от 1 до 0,01 мк). Объем дыма (m^3), образующегося при горении единицы массы (кг) или объема (m^3) горючего вещества, приведен в табл. 1.2.

Таблица 1.2. Объем дыма при сгорании некоторых горючих веществ

Наименование горючего вещества	Объем дыма на единицу массы или объема горючего вещества	
	m^3/kg	m^3/m^3
Ацетон	8,14	—
Бензин	12,59	—
Бумага	4,21	—
Древесина (сосна):		
воздушно-сухая ($W = 20 \%$)	4,40	—
в конструкциях зданий ($W = 7 \%$)	4,90	—
Каучук синтетический	10,82	—
Керосин	12,80	—
Резина	10,82	—
Ацетилен	—	12,40
Бутан	—	33,44
Водород	—	2,88
Метан	—	10,52
Оксид углерода	—	2,88
Пропан	—	25,80
Природный газ	—	10,40
Этан	—	18,16

Продукты неполного сгорания, как при термической, так и при термоокислительной деструкции, являются токсичными.

Под токсичностью обычно понимают степень вредного воздействия химического вещества на живой организм. К числу наиболее опасных соединений, в составе продуктов сгорания которых образуются вещества, характеризующиеся высокой токсичностью, относятся полимерные материалы, строительные материалы (линолиту, пенопласты), резинотехнические изделия. При сгорании этих материалов образуются монооксид углерода (угарный газ), циановодород, хлористый водород, оксиды азота, акролеин, фосген и другие опасные вещества. Угарный газ является наиболее распространенным продуктом неполного сгорания. Это бесцветный газ без запаха и вкуса, с плотностью $1,25 \text{ кг/м}^3$, слабо растворимый в воде, который горит синим пламенем с образованием CO_2 .

1.2.1. Расход воздуха при горении

Для полного сгорания необходимо определенное количество кислорода. Однако на воздухе процесс горения идет несколько иначе, чем в чистом кислороде. Поэтому для сжигания того или иного топлива рассчитывают теоретически необходимое количество воздуха.

Под теоретически необходимым количеством воздуха понимается минимальное количество воздуха, необходимое для полного сгорания единицы массы (кг) или объема (м^3) горючего вещества. Теоретически необходимое количество воздуха обозначается V_B^0 .

В табл. 1.3 и табл. 6 (прил. III) приведены значения теоретически необходимых количеств воздуха для полного сгорания различных веществ при 0°C и 760 мм рт. ст. Значения величин, приведенных для древесины, торфа, бензина, керосина, нефти и водяного пара, являются средними, так как состав этих горючих материалов непостоянен.

Расход кислорода и количество образующихся продуктов сгорания определяют из уравнения горения, записанного для одного моля горючего вещества.

На примере сгорания углерода рассмотрим, какое количество кислорода необходимо для его полного сгорания.

Для одного моля углерода уравнение горения имеет вид:

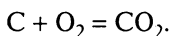


Таблица 1.3. Теоретически необходимое количество воздуха для полного сгорания веществ

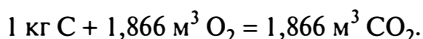
Горючее вещество	Количество воздуха для сгорания 1 кг вещества при 760 мм рт. ст.		Горючее вещество	Количество воздуха для сгорания 1 кг вещества при 760 мм рт. ст.	
	кг	м ³		кг	м ³
Ацетон	9,45	7,35	Ацетилен	15,4	11,9
Бензол	13,2	10,25	Бутан	39,8	30,94
Бензин	14,3	11,1	Водород	3,08	2,38
Древесина	5,4	4,18	Водяной газ	2,84	2,2
Керосин	14,85	11,5	Метан	12,3	9,52
Нефть	13,9	10,8	Окись углерода	3,08	2,38
Толуол	12,9	10,0	Пропан	30,6	23,8
Торф	7,5	5,8	Природный газ	6,45	5,0

* Объем воздуха приведен к нормальным условиям: 760 мм рт. ст. и 0 °С.

Выразим мольные значения составляющих уравнения через количественные (кг); атомные веса элементов берем из табл. 7 (прил. III):



Отнесем это уравнение к 1 кг горючего, а газообразные составляющие уравнения выразим в объемных единицах: массовые количества кислорода и диоксида углерода делим на их плотности, взятые из табл. 4 (прил. III). Отсюда имеем:



Следовательно, для полного сгорания 1 кг углерода требуется 1,866 м³ кислорода.

В случае если горючее вещество содержит в своем составе, кроме углерода, также серу, водород и кислород, то теоретически необходимое количество кислорода для сжигания 1 кг такого твердого или жидкого горючего вещества будет определяться следующим образом: суммируются затраты кислорода на сжигание горючих элементов в 1 кг горючего вещества, а затем вычитается количество кислорода, содержащегося в этом горючем веществе.

В общем виде расчетная формула имеет вид:

$$V^0 = 1,866 C^P/100 + 0,7 S^P/100 + 5,55 H^P/100 - O^P/100 \cdot \rho, \quad (1.1)$$

где C^P , S^P , H^P , O^P — соответственно массовое содержание углерода, серы, водорода и кислорода в горючем веществе (в %); ρ — плотность кислорода (в кг/м³).

В воздухе содержится кислорода примерно 21 % по объему, поэтому теоретически необходимое количество воздуха V^0 (м³/кг) для горения веществ, топлив и др. рассчитывают по формуле:

$$V^0 = \frac{V_{O_2}^0}{0,21}. \quad (1.2)$$

Преобразуем формулу (1.1) с использованием выражения (1.2). Отсюда имеем следующее выражение:

$$V^0 = 0,0889(C^P + 0,375 S^P) + 0,265 H^P - 0,0333 O^P. \quad (1.3)$$

При горении, особенно во время пожара, расходуется воздуха значительно больше теоретически необходимого.

Разность между количеством воздуха, практически расходуемым при горении и теоретически необходимым, называется избытком воздуха:

$$\Delta V_B = V_B - V_B^0.$$

Отношение же количества воздуха, практически расходуемого при горении ($V_{B,п.р.}$), к теоретически необходимому называется коэффициентом избытка воздуха и обозначается α :

$$\alpha = \frac{V_{B,п.р.}}{V_B^0}. \quad (1.4)$$

Используя выражение (1.4), имеем:

$$\Delta V_B = V_B^0 (\alpha - 1).$$

В случае если известно содержание кислорода в продуктах горения, то коэффициент избытка воздуха определяется по формуле:

$$\alpha = 1 + \frac{\varphi_{O_2} V_{п.г}^0}{V_B^0 (21 - \varphi_{O_2})}, \quad (1.5)$$

где φ_{O_2} — концентрация кислорода в продуктах горения, % об.

Для горючих веществ, у которых объем продуктов горения равен объему израсходованного воздуха (например, для углерода), формула (1.5) упрощается:

$$\alpha = \frac{21}{21 - \varphi_{\text{O}_2}}. \quad (1.6)$$

В случае образования продуктов неполного сгорания (CO , H_2 , CH_4 и др.) формула (1.6) приобретает вид:

$$\alpha = \frac{21}{21 - \varphi_{\text{O}_2} + 0,5 \varphi_{\text{CO}_2} + 0,5 \varphi_{\text{H}_2} + 2 \varphi_{\text{CH}_4}}, \quad (1.7)$$

где φ_{O_2} , φ_{CO_2} , φ_{H_2} , φ_{CH_4} — содержание соответствующих веществ в продуктах горения, % об.

В случае если содержание кислорода в окислительной среде отличается от содержания его в воздухе, то формула (1.5) может быть записана в виде:

$$\alpha = 1 + \frac{\varphi_{\text{O}_2} V_{\text{п.г}}^0}{V_{\text{в}}^0 (\varphi_{\text{O}_2}^{\circ} - \varphi_{\text{O}_2})}, \quad (1.8)$$

и соответственно формула (1.6) имеет выражение:

$$\alpha = \frac{\varphi_{\text{O}_2}^{\circ}}{\varphi_{\text{O}_2}^{\circ} - \varphi_{\text{O}_2}}, \quad (1.9)$$

где $\varphi_{\text{O}_2}^{\circ}$ — исходное содержание кислорода в среде, % об.

Таким образом, на практике, когда горение протекает с естественным притоком воздуха, коэффициент избытка воздуха в большинстве случаев больше единицы ($\alpha > 1$) и колеблется в широких пределах.

1.2.2. Объем продуктов сгорания

При сжигании горючих веществ в промышленных целях важно знать не только количество воздуха (кислорода), необходимого для эффективного сжигания различных видов топлив, но и объем продуктов сгорания.

Расчет объема газообразных продуктов сгорания позволяет правильно подбирать устройства для сжигания топлив (топки, печи и пр.).

Общий объем продуктов сгорания горючего вещества рассчитывается с учетом объемов газообразных продуктов, выделяющихся при сгорании; объема азота, а также объема водяного пара, образующегося в процессе горения. В общем виде формула расчета объема продуктов сгорания имеет следующий вид:

$$V_{п.г}^0 = V_{RO_2}^0 + V_{N_2}^0 + V_{H_2O}^0, \quad (1.10)$$

где $V_{п.г}^0$ — теоретический объем продуктов сгорания, м³/кг;

$V_{RO_2}^0$ — объем сухих газов (диоксидов), м³/кг;

$V_{N_2}^0$ — объем азота, участвующего в реакции горения, м³/кг.

$V_{H_2O}^0$ — объем водяного пара, м³/кг.

Практический (полный) объем продуктов горения состоит из теоретического объема продуктов горения и избытка воздуха.

$$V_{пг} = V_{п.г}^0 + \Delta V_B \quad (1.11)$$

При сжигании топлива на воздухе коэффициент избытка воздуха $\alpha > 1$. Поэтому действительный объем продуктов сгорания будет больше теоретического на величину объема избыточно поданного воздуха $(\alpha - 1) \cdot V_B^0$

$$V_{п.г} = V_{п.г}^0 + V_B^0(\alpha - 1). \quad (1.12)$$

С учетом объема водяных паров, содержащихся в воздухе — $0,0161 \cdot (\alpha - 1) \cdot V_B^0$, уравнение полного объема продуктов сгорания имеет следующий вид:

$$V_{п.г} = V_{п.г}^0 + 0,0161 \cdot (\alpha - 1) \cdot V_B^0, \quad (1.13)$$

где значение 0,0161 показывает соотношение между теоретически рассчитанным и практически образующимся объемом водяных паров.

Расчет объема продуктов сгорания зависит от состава горючего вещества или состава смеси горючих веществ. В каждом конкретном случае объем продуктов сгорания рассчитывается с учетом этих особенностей.

Состав продуктов горения, т. е. содержание i -го компонента определяется по формуле:

$$\varphi_{п.г.i} = \frac{V_{п.г.i}}{\sum V_{п.г.i}} 100, \quad (1.14)$$

где $\varphi_{n,gi}$ — содержание i -го компонента в продуктах горения, % об.;

$V_{n,gi}$ — объем i -го компонента, м³, кмоль;

$\Sigma V_{n,gi}$ — полный объем продуктов горения, м³, кмоль.

При развитии процесса горения в избытке воздуха в продуктах горения содержатся кислород и азот, объем которых определяется по формулам:

$$V_{O_2} = 0,21 \Delta V_B; \quad (1.15)$$

$$V_{N_2} = V_{N_2}^0 + 0,79 \Delta V_B^0, \quad (1.16)$$

где $V_{N_2}^0$ — теоретический объем азота в продуктах горения, м³, кмоль:

$$V_{N_2}^0 = 0,79 \Delta V_B^0. \quad (1.17)$$

Более подробно ознакомимся с расчетом объема продуктов сгорания, получаемого в процессе горения, в практической работе 2 (см. с. 101).

Состав продуктов сгорания (в объемных %), возникающих во время пожара в различных помещениях, показывает, что в них всегда содержится значительное количество кислорода.

Наличие кислорода в продуктах сгорания указывает на то, что горение в условиях пожара происходит всегда при избытке воздуха.

В продуктах сгорания могут содержаться самые разные вещества, в том числе и токсичные, например, хлористый водород, сероводород, оксиды азота, синильная кислота и др. Ниже (табл. 1.4) приведены некоторые материалы, образующие при разложении и горении токсичные вещества.

Таблица 1.4. Токсичные вещества, образующиеся при горении некоторых материалов

Наименование материала	Токсичные вещества
Бутадиен-нитрильный каучук	Синильная кислота, оксид углерода
Винилпласт, пластикат	Хлористый водород, оксид углерода
Капрон, анид	Синильная кислота
Линолеум «Релин»	Сероводород, сернистый газ
Органическое стекло	Оксиды азота, акрилонитрил
Пенополиуретан	Синильная кислота, толуилендиизоцианат
Фторопласты	Фтористый водород, фторфосген
Хлоропреновый каучук	Хлористый водород

1.3. Виды и режимы горения

Процесс горения определяется следующими характеристиками:

- механизмом распространения зоны химической реакции (дефлаграционное и детонационное горение);
- природой химических реакций в зоне их протекания (гомогенное и гетерогенное горение);
- кинетическими параметрами режима горения (кинетическое и диффузионное горение);
- газодинамическими параметрами режима горения (ламинарное и турбулентное горение).

1.3.1. Распространение зоны химической реакции

Различают две характерных разновидности горения в зависимости от механизма распространения зоны химических реакций горения по горючей смеси: *дефлаграционное* и *детонационное горение*.

Дефлаграция — это процесс горения, сопровождающийся выделением огромного количества теплоты при сравнительно медленном распространении зоны химической реакции, со скоростью движения тепловой волны по горючей смеси от 0,5 до 50 м/с.

Детонация — это горение, при котором распространение зоны химической экзотермической реакции протекает со скоростью ударной волны, от нескольких сотен метров в секунду до нескольких километров в секунду.

1.3.2. Гомогенное и гетерогенное горение

В зависимости от агрегатного состояния компонентов горючей смеси (горючего вещества и окислителя) непосредственно в зоне протекания химических реакций различают два вида (режима) горения:

- *гомогенное горение*, когда оба компонента находятся в одной фазе (однородные горючие смеси);
- *гетерогенное горение*, когда агрегатное состояние у компонентов горючей системы различное (неоднородные горючие смеси).

Поскольку в качестве окислителя в реакциях горения чаще всего участвует кислород воздуха, т. е. один из компонентов горючей системы находится всегда в газообразном состоянии, гомогенное горение

бывает в тех случаях, когда второй компонент горючей смеси — само горючее вещество — находится в таком же агрегатном состоянии: газо- или парообразном.

Схематично гомогенное горение представлено на рис. 1.1. Гомогенным горением является горение паров, поднимающихся со свободной поверхности жидкости.



Рис. 1.1. Схема зоны горения паров жидкости — гомогенное горение

Горение газа, выходящего из труб, также является примером гомогенного горения.

Жидкости и твердые горючие вещества горят преимущественно в режиме гетерогенного горения. В зону горения поступают не сами эти жидкости и твердые вещества, а газо- и парообразные продукты испарения этих жидкостей, а также продукты их термического разложения.

Примером горения на поверхности твердого вещества — гетерогенного горения — является горение кокса, антрацита, древесного

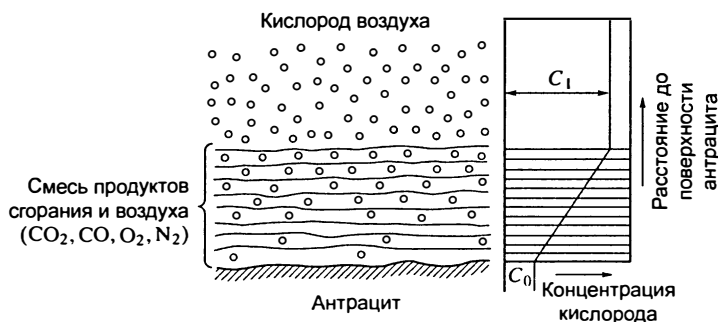


Рис. 1.2. Схема диффузии кислорода в зону горения твердого вещества (гетерогенное горение)

угля. В этом случае диффузии кислорода к зоне горения также препятствуют продукты сгорания, как видно из схемы, представленной на рис. 1.2. Концентрация кислорода в объеме (C_1) значительно больше концентрации его вблизи зоны горения (C_0). В отсутствие достаточного количества кислорода в зоне горения химическая реакция горения тормозится.

1.3.3. Кинетические параметры процесса горения

Гомогенное или гетерогенное горение может протекать в кинетическом или диффузионном режимах горения.

Наличие того или иного режима горения определяется временем сгорания горючего вещества. Рассмотрим протекание процесса горения в зависимости от времени сгорания. Обозначим время сгорания горючей смеси τ_r ; время контакта между горючим веществом и окислителем (кислородом) — τ_k и время протекания самой химической реакции — τ_x . Тогда полное время сгорания горючей смеси τ_r будет складываться из времени, необходимого для возникновения контакта между горючим веществом и окислителем (кислородом) τ_k и времени, в течение которого протекает сама химическая реакция τ_x :

$$\tau_r = \tau_k + \tau_x. \quad (1.18)$$

В зависимости от соотношения этих двух слагаемых в уравнении (1.18) различают горение кинетическое и диффузное. При горении твердых горючих веществ время, необходимое для проникновения (диффузии) кислорода к поверхности вещества, гораздо больше времени собственно химической реакции, $\tau_k \gg \tau_x$. Поэтому общая скорость горения полностью определяется скоростью диффузии кислорода к горючему веществу. Горение таких веществ наиболее часто встречается в практике и называется *диффузионным*. В этом случае говорят, что процесс горения протекает в диффузионной области или диффузионном режиме, при этом общее время горения практически можно рассматривать как: $\tau_r \approx \tau_k$. Это означает, что процесс горения определяется в основном диффузией кислорода к горючему веществу.

Горение, скорость которого определяется скоростью химической реакции, называется *кинетическим*. Необходимым условием для кинетического горения является преобладание τ_x над τ_k , т. е. $\tau_x \gg \tau_k$. В этом случае можно принять $\tau_r \approx \tau_x$. Следовательно, процесс горения

протекает в кинетической области или кинетическом режиме. В таком режиме горят однородные горючие системы, в которых молекулы кислорода хорошо перемешаны с молекулами горючего вещества и не затрачивается время на смесеобразование. Так как скорость химической реакции при высокой температуре велика, горение таких смесей происходит мгновенно и носит характер взрыва.

Горение предварительно равномерно перемешанных газо- или паровоздушных смесей всегда протекает в кинетическом режиме, так как смесь горючего с окислителем (равномерная на молекулярном уровне смешения) существует еще до момента ее воспламенения и суммарная скорость процесса горения лимитируется только скоростью химических реакций окисления и скоростью перемещения зоны реакций горения по горючей смеси. Если горение такой газовой смеси происходит в замкнутом или ограниченном объеме, оно воспринимается как взрыв, так как энергия, выделяющаяся при сгорании смеси, не успевает отводиться за пределы рассматриваемого объема, давление возрастает и может привести к разрушению конструкции.

Примером спокойного кинетического горения является горение газовой смеси на конфорках кухонной газовой плиты, когда смесь хорошо подготовлена и пламя имеет равномерную сине-голубую окраску (без желтых или красноватых оконечностей языков пламени). Появление желто-оранжевых зон в пламени — признак недостатка воздуха, плохого смешения, образования продуктов неполного сгорания, в том числе светящихся желтым светом сажистых частиц. Также кинетическим горением является сгорание метана в устье газового факела. При истечении метана под большим давлением смешивание его с воздухом перед факелом пламени будет столь интенсивным и равномерным, что пламя будет почти полностью кинетическим.

Примером диффузионного горения является горение фонтанирующей нефти, горение при пожарах в резервуарах с легковоспламеняющимися жидкостями (ЛВЖ), горючими жидкостями или штабелей древесины.

1.3.4. Газодинамические параметры режима горения

В зависимости от газодинамического состояния горючей смеси, а именно характера потока горючей смеси и окислителя, различают *ламинарный* и *турбулентный режимы горения*.

Газодинамическое состояние характеризуется интенсивностью поступления в зону реакции горючей смеси.

Ламинарный режим горения характеризуется спокойным поступлением в зону горения компонентов горючей смеси. При таком режиме горения наблюдается плавный переход от зоны смесеобразования к зоне горения и далее — к зоне формирования потока продуктов горения. На рис. 1.3 дана схема ламинарно-диффузионного режима горения. Зона горения представляет собой тонкий слой, в котором протекает непосредственно горение. В этом слое возникают диффузионные процессы: соприкосновение слоев воздуха и горючего.

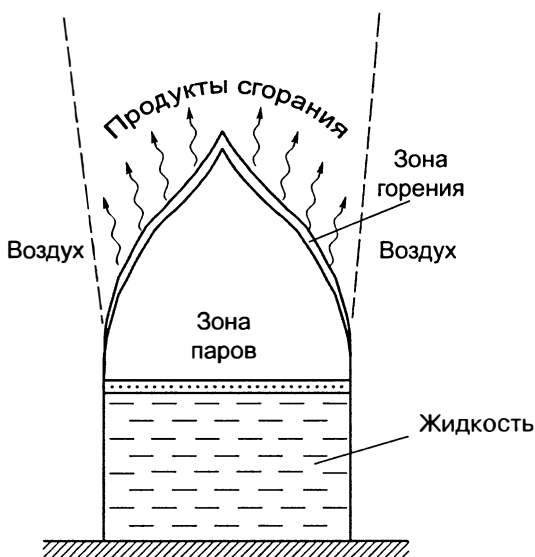


Рис. 1.3. Схема ламинарно-диффузионного горения

При **турбулентном режиме горения** компоненты горючей смеси поступают в зону горения бурно, образуя завихрения. Такой режим характерен для горения газов.

Под турбулентностью следует понимать поступление газозвуш-ных смесей из емкостей или аппаратов с большой скоростью движе-ния газового потока. При таком режиме происходит интенсивное пе-ремешивание горючих газов.

На рис. 1.4 показаны режимы ламинарного и турбулентного горе-ния газозвушной горючей смеси. Зона горения при ламинарном ре-

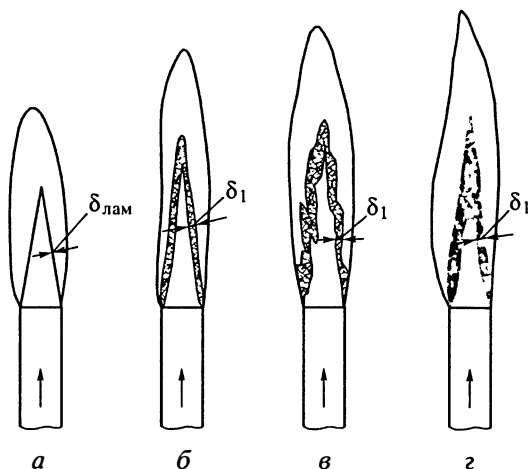


Рис. 1.4. Режимы горения:

a — ламинарное; *б* — мелкомасштабная турбулентность; *в* — масштаб турбулентности превышает толщину зоны горения; *г* — крупномасштабная турбулентность

жиме имеет четкую границу ($\delta_{\text{лам}}$); при турбулентном режиме зона горения размыта (δ_1).

1.4. Стадии процесса горения

Процесс горения — это многоступенчатый процесс, состоящий из стадий, представленных на рис. 1.5. Холодная горючая среда (твердая, жидкая или газообразная) при появлении теплового импульса (источника зажигания) разогревается, происходит интенсивное окисление горючей среды кислородом, при этом имеет место дополнительное выделение теплоты. Выделившаяся теплота разогревает соседний слой горючего вещества, в котором также протекает химическая реакция горения.

Горению жидкостей предшествует процесс ее испарения под действием теплоты от источника зажигания. При этом над поверхностью горючей жидкости образуется смесь горючих паров или газов с воздухом (кислородом).

Горение твердых веществ проходит те же стадии, что и горение жидкостей, но вместо испарения наблюдается стадия плавления или разложения под действием теплоты от источника зажигания.



Рис. 1.5. Схема процесса горения веществ

1.5. Теплота горения

В процессе горения горючих веществ выделяется тепловая энергия.

Количество теплоты, выделяющейся при сгорании единицы массы вещества или единицы объема горючего вещества с образованием продуктов полного горения, называется теплотой горения и обозначается $Q_{\text{гор}}$.

Теплоту сгорания можно вычислить, используя закон Гесса. Русский химик Г.Г. Гесс в 1840 г. открыл закон, который является частным случаем закона сохранения энергии.

Закон Гесса формулируется следующим образом.

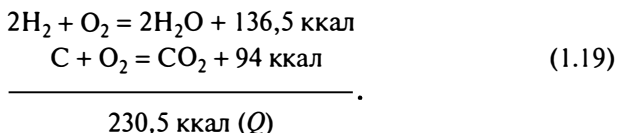
Тепловой эффект химического превращения не зависит от пути, по которому протекает реакция, а зависит лишь от начального и конечного состояния системы при условии, что температура и давление (или объем) в начале и конце реакции одинаковы.

Использование закона Гесса для расчета теплоты горения горючих веществ поясним на следующем примере.

Пример. В результате сгорания простых веществ: водорода и углерода, — образуются 2 моля воды H_2O и 1 моль диоксида углерода CO_2 . Общее количество теплоты, выделившейся при этих реакциях, равно 230,5 ккал (1.19). Необходимо определить теплоту горения $Q_{\text{гор}}$.

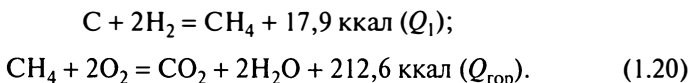
Решение

Напишем уравнение горения водорода и углерода:



Полученные в результате горения продукты сгорания — углекислый газ (CO_2) и вода (H_2O) можно получить и другим путем. Например, водород и углерод, взятые в том же количестве, реагируют, образуя метан. При этой реакции выделяется теплота $Q_1 = 17,9$ ккал (1.20).

При последующем сжигании метана получают 2 моль H_2O и 1 моль CO_2 , при этом выделяется теплота горения ($Q_{\text{гор}} = 212,6$ ккал).



Используем закон Гесса: поскольку начальные продукты (водород, углерод и кислород) и конечные продукты (вода и углекислый газ) в обеих реакциях одинаковы (1.19) и (1.20), их общие тепловые эффекты должны быть равными.

Действительно, общий тепловой эффект реакций Q (1.19) составляет 230,5 ккал, и в случае реакций (1.20) — $(17,9 + 212,6) = 230,5$.

Следовательно:

$$Q_1 + Q_{\text{гор}} = Q,$$

отсюда

$$Q_{\text{гор}} = Q - Q_1.$$

Проверим правильность уравнения:

$$Q_{\text{гор}} = 230,5 - 17,9 = 212,6 \text{ ккал.}$$

Таким образом, теплота горения химического соединения или смеси веществ ($Q_{\text{гор}}$) равна разности между суммой теплот образова-

ния продуктов сгорания (Q) и теплотой образования сгоревшего химического вещества (Q_1).

Теплота горения горючих веществ подразделяется на высшую теплоту горения Q_v и низшую теплоту горения Q_n .

Высшей теплотой сгорания Q_v называется количество теплоты, выделяющейся при полном сгорании единицы горючего вещества при условии, что образующиеся в продуктах горения пары конденсируются с образованием жидкой воды.

Низшей теплотой горения Q_n горючего вещества называется количества теплоты, которая выделяется при полном сгорании единицы горючего вещества и условии, что влага, содержащаяся в продуктах горения, находится в парообразном состоянии.

Для индивидуального вещества Q_n — величина постоянная и находится по справочной литературе, а для сложных многокомпонентных горючих смесей зависит от их состава и может быть рассчитана по формуле Д.И. Менделеева.

Низшая теплота горения отличается от высшей на величину теплоты, расходуемой на испарение влаги, имеющейся в продуктах сгорания. Кроме того, количество теплоты, выделяющейся при полном сгорании единицы массы горючего вещества, зависит от того, в каком агрегатном состоянии (парообразном или жидком) находится влага в продуктах сгорания.

Соотношение между низшей и высшей теплотами горения можно записать в следующем виде:

$$Q_v - Q_n = G_{H_2O} \lambda_n, \quad (1.21)$$

где масса влаги, содержащейся в 1 кг горючего вещества (W), и влаги, образующейся в результате горения водорода при постоянном давлении (H), равна:

$$G_{H_2O} = \frac{9H + W}{100}; \quad (1.22)$$

λ_n — теплота парообразования, условно принимается равной 2,51 МДж/кг.

Низшую теплоту горения сложной горючей смеси рассчитывают по следующей формуле, используя справочные данные стандартных теплот образования каждого компонента горючей смеси:

$$Q_n = \sum_{i=1}^k (\Delta H_{f_{n,i}} m_i) - \Delta H_{f_r} n_r, \quad (1.23)$$

где $\Delta H_{\text{fn},i}$, $\Delta H_{\text{fг}}$ — соответственно стандартные теплоты образования i -го продукта горения (п.г) и горючего (г), кДж/моль; кДж/м³;

$n_{\text{г}}$, m_i — стехиометрические коэффициенты в уравнении реакции горения.

Для большинства веществ эти величины приведены в термодинамических справочниках.

Высшую и низшую теплоты горения твердых и жидких горючих смесей определяют *по формуле Д.И. Менделеева*:

$$Q_{\text{в}} = 339,4 [\text{C}] + 1257 [\text{H}] - 108,9 ([\text{O}] - [\text{S}]); \quad (1.24)$$

$$Q_{\text{н}} = 339,4 [\text{C}] + 1257 [\text{H}] - 108,9 ([\text{O}] - [\text{S}]) - 25,1 (9 [\text{H}] + \text{W}), \quad (1.25)$$

где $Q_{\text{в}}$ и $Q_{\text{н}}$ — высшая и низшая теплоты горения, кДж/кг;

[C], [H], [S], W — содержание в горючем веществе углерода, водорода, серы и влаги, % масс;

O — сумма кислорода и азота, % масс.

Низшую теплоту горения как индивидуального химического соединения, так и смеси простых горючих веществ можно рассчитать используя закон Гесса.

Расчет теплоты горения газозвоздушных смесей проводят по формуле

$$Q_{\text{н}}^{\text{см}} = \frac{1}{100} Q_{\text{н}} \varphi_{\text{г}}, \quad (1.26)$$

где $Q_{\text{н}}^{\text{см}}$ — теплота горения газозвоздушной смеси, кДж/м³, кДж/кмоль;

$Q_{\text{н}}$ — низшая теплота горения горючего вещества, кДж/м³, кДж/кмоль;

$\varphi_{\text{г}}$ — концентрация горючего в смеси с окислителем, % об.

Удельная скорость (интенсивность) тепловыделения при горении равна

$$q = Q_{\text{н}} \nu_{\text{м}}, \quad (1.27)$$

где q — удельная интенсивность тепловыделения кВт/м²;

$\nu_{\text{м}}$ — массовая скорость выгорания, кг/(м² · с).

Интенсивность тепловыделения при горении равна:

$$Q = Q_{\text{н}} \nu_{\text{м}} F, \quad (1.28)$$

где Q — интенсивность тепловыделения, кВт;
 F — площадь горения, м².

Пояснения использования закона Гесса и формулы Д.И. Менделеева для расчета теплоты горения даны в практической работе 4.

В табл. 8—9 (прил. III) представлены данные теплот горения некоторых горючих веществ и материалов.

1.6. Температура горения

Пожарная опасность горючих веществ характеризуется температурными параметрами, одним из которых является температура горения.

В зоне горения выделившаяся теплота тратится на разогрев продуктов сгорания, вследствие чего их температура достигает высоких значений.

Максимальная температура, до которой нагреваются продукты горения, называется температурой горения.

Учитывая, что теплоемкости продуктов горения несущественно отличаются от теплоемкостей исходных веществ, можно записать формулу для расчета температуры горения:

$$T_{\text{г}} = T_{\text{о}} + \frac{Q_{\text{п.г}} - Q_{\text{исх}}}{\sum_{i=1}^k V_{\text{п.г}} \times C_{p_i}}, \quad (1.29)$$

где $T_{\text{г}}$ — температура горения, К;

$T_{\text{о}}$ — начальная температура горючего и окислителя, К;

$Q_{\text{п.г}}$ — количество теплоты, затраченной на нагрев продуктов горения, кДж/моль; кДж/кг; кДж/м³;

$Q_{\text{исх}}$ — количество теплоты, поступившей в зону горения с горючим и окислительной средой, кДж/моль; кДж/кг; кДж/м³;

$V_{\text{п.г}}$ — объем i -го компонента продуктов горения, кмоль/кмоль, м³/кг, м³/м³;

C_{p_i} — удельная теплоемкость i -го компонента продуктов горения, кДж/(м³ · К), кДж/(кмоль · К).

Различают *калориметрическую, теоретическую и действительную* температуры горения.

Под *калориметрической температурой горения* понимается та температура, до которой нагреваются продукты горения, если выполняются следующие условия:

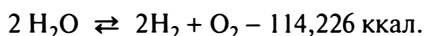
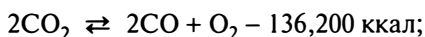
- все выделяющаяся при горении теплота расходуется на нагревание продуктов сгорания, потери теплоты равны нулю $Q_{п.г} = Q_n$;
- начальная температура воздуха и горючего вещества равна 0°C или $T_0 = 273,15\text{ K}$;
- количество воздуха равно теоретически необходимому, $\lambda = 1$;
- происходит полное сгорание горючего вещества.

Калориметрическая температура горения зависит только от состава горючего вещества и не зависит от его количества.

Теоретическая температура горения имеет место в том случае, когда часть теплоты расходуется на диссоциацию (распад) продуктов горения:

$$Q_{п.г} = Q_n - Q_{дис}$$

Теоретическая температура, в отличие от калориметрической, характеризует горение с учетом эндотермических процессов диссоциации продуктов сгорания, протекающих при высокой температуре:



Практически диссоциацию продуктов сгорания необходимо учитывать только при температуре выше 1700°C . В реальных условиях в диффузионном режиме горения действительная температура горения не достигает таких значений. Поэтому на практике используют только калориметрическую температуру горения.

Действительной температурой горения называется та температура, до которой нагреваются продукты горения в реальных условиях.

Действительную температуру называют также практической температурой.

Практической температурой называется та температура, которую имеют зона горения или продукты сгорания при учете всех видов потерь. Один из видов потерь — потери на химический и физический недожог, учитывается *коэффициентом неполноты сгорания*, или *недожога* β . Другой неизбежный вид потерь при горении — потери на излучение факела пламени. Доля этих потерь зависит прежде всего от температуры излучающего тела, от его агрегатного состояния и хими-

ческой природы. Эта зависимость определяется *коэффициентом черноты излучающего тела ϵ и длиной волны излучения различных молекул*. Кроме того, значительную долю потерь составляют кондуктивно-конвективные потери тепла в окружающую среду.

Таким образом, в процессе сгорания веществ наблюдается до 25—30 % потерь теплоты на неполноту горения, до 30—40 % — на излучение и т. д. Соответственно практическая температура горения оказывается еще ниже.

Для расчета температуры горения исходят из уравнения теплового баланса: суммарное теплосодержание (энтальпия) компонентов продуктов сгорания равна количеству теплоты, затраченной на их нагрев. Отсюда формула расчета температуры горения имеет вид:

$$Q_{п.г}^{T_r} = \sum_{i=1}^k V_{п.г.i} C_{p_i} (T_r - T_o), \quad (1.30)$$

где $Q_{п.г}^{T_r}$ — теплота продуктов горения, кДж/моль; кДж/кг; кДж/м³;

$V_{п.г.i}$ — объем i -го компонента горючей смеси, м³;

C_{p_i} — удельная теплоемкость i -го компонента горючей смеси;

T_r — температура горения, К;

T_o — начальная температура горючего и окислителя, К.

При этом адиабатическая температура горения

$$T_r = T_o + \frac{Q_n}{\sum C_{p_i} V_{п.г}^o}, \quad (1.31)$$

а действительная температура горения

$$T_{г.д} = T_o + \frac{Q_{п.г}}{\sum C_{p_i} V_{п.г}}, \quad (1.32)$$

где Q_n — низшая теплота горения вещества;

$Q_{п.г}$ — теплота, расходуемая на нагрев продуктов горения.

При этом теплота, пошедшая на нагрев продуктов горения, определяется по формуле

$$Q_{п.г} = Q_n (1 - \eta),$$

где η — доля теплотерь в результате излучения энергии, химического и механического недожога.

Для расчета калориметрической температуры горения исходят из того, что низшая теплота горения Q_n горючего вещества равна тепло-

содержанию q_r , необходимому для нагревания продуктов сгорания от 0°C до calorиметрической температуры:

$$Q_n = q_r \cdot$$

Теплосодержание q_r зависит от объема продуктов сгорания, температуры горения, удельной теплоемкости продуктов сгорания:

$$q_r = V_{п.г} C_p T_r \quad (1.33)$$

1.7. Воспламенение.

Температура воспламенения

Воспламенением называется процесс возникновения горения, происходящий в результате нагрева части горючего вещества источником зажигания. При этом температура всей остальной массы горючего вещества остается первоначальной. Воспламенение сопровождается появлением пламени. Воспламенением называют также вынужденное воспламенение, возгорание или зажигание.

Причинами воспламенения могут быть не только теплота, излучаемая нагретым, раскаленным или горящим телом, но и эквивалентная по мощности теплота, получаемая в результате механической работы, химической реакции, а также теплота, выделяемая при протекании электрического тока.

При химической реакции окисления горючего вещества воспламенение можно рассматривать как начальную стадию горения, в течение которой энергия, подводимая к системе от внешнего источника теплоты, приводит к резкому ускорению химической реакции.

Наиболее распространенным возгоранием является воспламенение в результате соприкосновения с нагретыми поверхностями, телами или открытым огнем. Воспламенение горючих веществ происходит при определенной температуре — температуре воспламенения (зажигания).

Температура воспламенения — наименьшая температура горючего вещества, при которой в условиях специальных испытаний вещество выделяет горючие пары или газы с такой скоростью, что после их зажигания возникает устойчивое пламенное горение.

Температура воспламенения обозначается T_v и измеряется в градусах Цельсия ($^\circ\text{C}$) или Кельвина (К).

Температура воспламенения является индивидуальным значением для каждого горючего вещества. Так, например, для газетной бумаги температура воспламенения соответствует $175\text{ }^{\circ}\text{C}$, для материалов из полистирола — $340\text{ }^{\circ}\text{C}$, а для материалов из полиэтилена — $410\text{ }^{\circ}\text{C}$.

1.7.1. Методы определения температуры воспламенения

Для определения температуры воспламенения определенную массу вещества нагревают, периодически зажигая выделяющиеся пары и визуально оценивая результаты зажигания.

Для измерения температуры воспламенения жидкостей и плавящихся твердых веществ применяют прибор с открытым тиглем, для измерения температуры воспламенения твердых веществ — прибор ОТП (рис. 1.6).

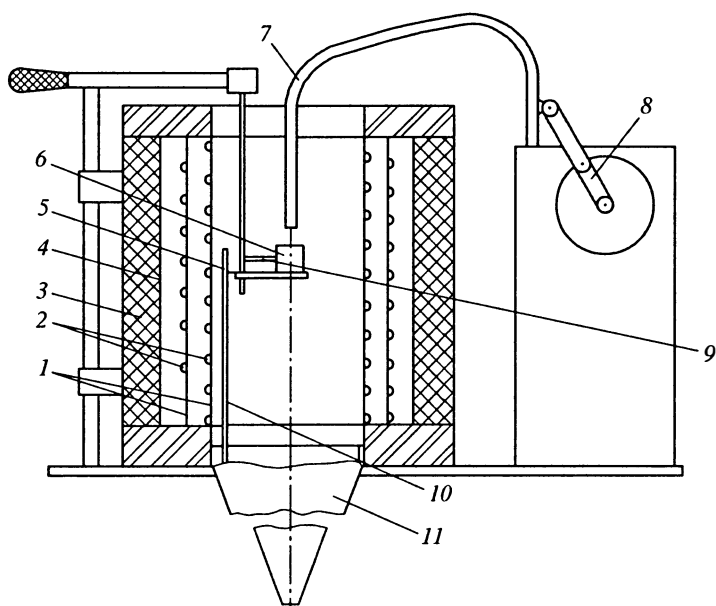


Рис. 1.6. Прибор ОТП:

1 — стеклянные цилиндры; 2 — спиральные электронагреватели; 3 — теплоизоляционный материал; 4 — стальной экран; 5 — держатель образца; 6 — стальной контейнер; 7 — газовая горелка; 8 — кривошипный механизм; 9, 10 — термопары; 11 — эжектор

При измерении температуры воспламенения жидкостей и плавящихся твердых веществ образец подготавливают так же, как и при измерении температуры вспышки. Вначале определяют ориентировочную температуру воспламенения. Для этого нагревают образец исследуемого вещества со скоростью 5—6 °С/мин.

Через каждые 5 °С повышения температуры производят испытание на воспламенение. Для этого пламя горелки перемещают от одной стороны тигля до другой в течение 1,5 с на расстоянии 14 мм от поверхности жидкости. Если пары исследуемого вещества воспламеняются и продолжают гореть не менее 5 с, то нагрев прекращают, и показание термометра в момент появления пламени принимают за температуру воспламенения. Если воспламенения паров не происходит или время самостоятельного горения после воспламенения составляет менее 5 с, то нагревание образца продолжают, периодически перемещая пламя горелки над тиглем, т. е. повторяют испытание на воспламенение.

Определив ориентировочную температуру воспламенения, проводят серию основных испытаний на трех образцах исследуемого вещества. За 10 °С до ориентировочной температуры воспламенения образец нагревают со скоростью 1 °С/мин для веществ с температурой воспламенения до 70 °С и 2 °С/мин для веществ с температурой воспламенения более 70 °С.

Зажигание пламенем газовой горелки производят при повышении температуры на каждый 1 °С для веществ с температурой воспламенения до 70 °С и на каждые 2 °С для веществ с температурой воспламенения более 70 °С.

За температуру воспламенения жидкости в каждом опыте принимают *наименьшую ее температуру, при которой образующиеся пары воспламеняются при поднесении пламени газовой горелки и продолжают гореть не менее 5 с после его удаления.* За температуру воспламенения исследуемого вещества принимают среднее арифметическое трех определений серии основных испытаний с поправкой на барометрическое давление.

Прибор ОТП (см. рис. 1.6) состоит из вертикальной электропечи с двумя коаксиально расположенными цилиндрами, выполненными из кварцевого стекла. Цилиндр с внутренним диаметром 80 мм и высотой 240 мм является рабочей камерой. Второй цилиндр имеет внутренний диаметр 110 мм. На цилиндры навиты спиральные электронагреватели общей мощностью не менее 2 кВт, что позволяет создавать температуру в рабочей камере 750 °С.

В качестве источника зажигания используют газовую горелку внутренним диаметром 4 мм.

Для испытаний твердых горючих веществ готовят не менее десяти образцов массой по 3 г. После установления в рабочей камере стационарного температурного режима держатель образца извлекают из рабочей камеры, в контейнер помещают образец и возвращают держатель в исходное положение. Зажигают горелку и формируют пламя в виде клина длиной от 8 до 10 мм.

Если при заданной температуре образец воспламенится, испытание прекращают, горелку останавливают в положении «вне печи», держатель с образцом извлекают из камеры. Следующее испытание проводят с новым образцом при меньшей температуре. Если в течение 20 мин образец не воспламенится, испытания прекращают, фиксируя «отказ».

Методом последовательных приближений определяют минимальную температуру рабочей камеры, при которой за время не более 20 мин образец воспламеняется от воздействия источника зажигания и горит более 5 с после его удаления, а при температуре на 10 °С ниже наблюдается «отказ» не менее чем в двух испытаниях.

За температуру воспламенения исследуемого вещества принимают среднее арифметическое двух температур, различающихся не более чем на 10 °С, при одной из которых наблюдается воспламенение двух образцов, а при другой — два отказа.

1.8. Самовоспламенение

При нагревании горючей смеси (паров горючей жидкости или горючего газа с воздухом) согласно закону Аррениуса скорость реакции окисления экспоненциально растет с повышением температуры. Теплота, выделяющаяся в зоне реакции окисления, частично отводится в окружающую горючую среду и стенку сосуда, а частично расходуется на повышение энтальпии смеси.

Если начальная температура горючей смеси высокая и выделяющаяся теплота не успевает отводиться во внешнюю среду, происходит лавинообразный процесс повышения температуры, заканчивающийся воспламенением. Такой процесс называется *самовоспламенением*, или *тепловым взрывом*.

Самовоспламенение — процесс возникновения горения, происходящий в результате протекания экзотермической химической реак-

ции окисления, приводящей к самопроизвольному нагреванию горючей смеси.

Самовоспламенение характеризуется резким повышением температуры, бурным выделением теплоты и появлением пламени. Температура, при которой возникает самовоспламенения горючей смеси, называется температурой самовоспламенения.

Температура самовоспламенения — самая низкая температура вещества, при которой в условиях специальных испытаний происходит резкое увеличение скорости экзотермической химической реакции, заканчивающейся пламенным горением.

В реальных условиях температура самовоспламенения может быть ниже указанной в справочной литературе, поскольку на ее величину оказывают влияние объем реакционного сосуда, материал стенок сосуда и ряд других факторов.

1.8.1. Условия, влияющие на температуру самовоспламенения

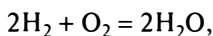
Температура самовоспламенения ($T_{\text{св}}$) горючего вещества не является постоянной величиной. Температура самовоспламенения горючей смеси зависит от свойств смеси, ее концентрации, материала реакционного сосуда, объема сосуда, поверхности и др.

Опасность воспламенения горючих смесей от нагретых поверхностей оценивается величиной температуры самовоспламенения.

Состав горючей смеси

Температура самовоспламенения смесей горючих паров или газов с воздухом изменяется в зависимости от их состава. Самой низкой бывает $T_{\text{св}}$ у стехиометрической горючей смеси.

Горючие смеси, которые по своему составу (соотношению компонентов горючего и окислителя) отвечают уравнению химической реакции, называются *смесями стехиометрического состава*. Например, для полного сгорания 2 молей водорода необходим 1 моль кислорода:



где коэффициенты химического уравнения перед водородом (2) и кислородом (1) являются стехиометрическими коэффициентами в процессе горения этой горючей смеси.

На графике рис. 1.7 показана зависимость $T_{\text{св}}$ смеси диоксида углерода с воздухом от ее состава. Из графика видно, что наименьшая температура самовоспламенения наблюдается у стехиометрической смеси (29,5 % об.).

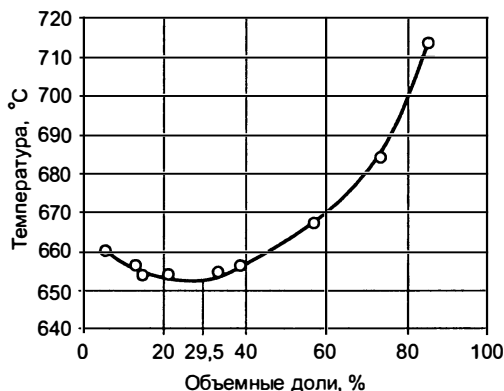


Рис. 1.7. Зависимость температуры самовоспламенения смеси оксида углерода с воздухом

Давление

Температура самовоспламенения горючих смесей зависит от давления. Чем выше давление, тем ниже температура самовоспламенения. Данные, приведенные в табл. 1.5, подтверждают влияние давления на $T_{\text{св}}$.

Таблица 1.5. Температура самовоспламенения при различном давлении

Давление · 10 ⁻⁵ Па	1	5	10	15	20	25
Вещество	$T_{\text{св}}, ^\circ\text{C}$					
бензин	480	350	310	290	280	250
бензол	680	620	590	520	500	490
керосин	460	330	250	220	210	200

Температура самовоспламенения горючей смеси уменьшается при повышении давления в связи с увеличением скорости химической реакции.

Катализаторы

Очень большое влияние на $T_{\text{св}}$ газов и жидкостей оказывают катализаторы, которые снижают $T_{\text{св}}$.

Катализаторы — это химические вещества, ускоряющие скорость химических реакций.

Катализаторы непосредственно вводятся в горючее вещество. Кроме химических катализаторов, каталитическими свойствами могут обладать даже стенки сосудов (тары и т. п.), в которых находится горючая смесь, или же нагретые поверхности твердого тела, являющиеся источником воспламенения.

Степень измельчения

Температура самовоспламенения твердых веществ зависит от степени их измельчения. Чем больше измельчено твердое горючее вещество, тем ниже его температура самовоспламенения.

В табл. 1.6 приведены $T_{\text{св}}$ некоторых горючих смесей.

Таблица 1.6. Температура самовоспламенения горючих смесей

Наименование вещества	Химическая формула	Температура самовоспламенения, $T_{\text{св}}$, °С
Уксусный ангидрид	$(\text{CH}_3 \text{CO})_2 \text{O}$	334
Ацетон	$(\text{CH}_3)_2 \text{CO}$	535
Бензол	$\text{C}_6 \text{H}_6$	560
1,3-Бутадиен	$\text{CH}_2=\text{CH}-\text{CH}=\text{CH}_2$	430
Изобутанол (бутанол-2)	$\text{CH}_3\text{CH}(\text{OH})\text{CH}_2\text{CH}_3$	408
Сероуглерод	CS_2	102
Хлорбензол	$\text{C}_6\text{H}_5\text{Cl}$	637
Циклогексан	C_6H_{12}	259
Циклогексанон	$\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}$	419
1,4-Диоксан	$\text{CH}_2\text{CH}_2\text{OCH}_2\text{CH}_2\text{O}$	379
Этилбензол	$\text{C}_6\text{H}_5-\text{C}_2\text{H}_5$	431
n-Гептан	$\text{C}_7 \text{H}_{16}$	215
n-Гексан	C_6H_{14}	233

Окончание табл. 1.6

Наименование вещества	Химическая формула	Температура самовоспламенения, $T_{св}$, °С
Метилаль	$\text{CH}_2(\text{OCH}_3)_2$	236
Нафталин	C_{10}H_8	528
<i>n</i> -Нонан	C_9H_{20}	205
2,2,4-Триметилпентан (изооктан)	$\text{CH}_3\text{CH}(\text{CH}_3)\text{CH}_2\text{C}(\text{CH}_3)_3$	411
<i>n</i> -Тетрадекан	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{12}\text{CH}_3$	201
Тетрагидрофуран	$\text{C}_4\text{H}_8\text{O}$	224
Толуол	$\text{C}_6\text{H}_5\text{CH}_3$	535
Трихлорсилан	SiHCl_3	230
Винилацетат	$\text{CH}_2=\text{CHCOOCH}_3$	385
<i>n</i> -Ксилол	$\text{C}_6\text{H}_4(\text{CH}_3)_2$	528

Примечания. 1. Значения температуры самовоспламенения определены методом по МЭК 60079-4—75 не менее чем в двух независимых лабораториях разных стран, с расхождением результатов не более 5 %.

2. Даже незначительное количество примесей может заметно изменять значение температуры самовоспламенения. Так, температура самовоспламенения трихлорсилана, равная 230 °С, определяется только при испытании на свежей пробе. После старения пробы (вследствие окисления и возможного изменения влажности пробы) значение температуры самовоспламенения может снизиться до 185 °С.

1.8.2. Методы определения температуры самовоспламенения

Существует целый ряд методов определения температуры самовоспламенения, которые отличаются, главным образом, способами нагрева смеси и смешения горючего с окислителем.

Метод впуска. Стандартную температуру самовоспламенения определяют для стехиометрического состава смеси в сосудах стандартных размеров методом впуска. Метод впуска впервые предложен Ле-Шателье и рекомендован Всероссийским научно-исследовательским институтом пожарной охраны (ВНИИПО) для определения $T_{св}$ и периода индукции. Схема установки для определения $T_{св}$ методом впуска показана на рис. 1.8.

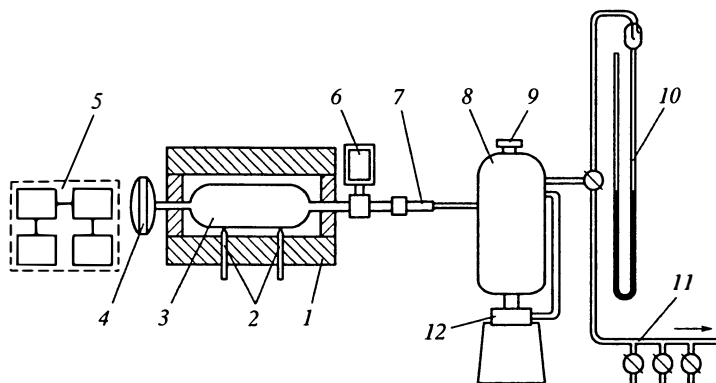


Рис. 1.8. Схема установки для определения температуры самовоспламенения газов методом впуска:

1 — нагревательная печь; 2 — термопары; 3 — реакционный (кварцевый) сосуд; 4 — датчики давления; 5 — блок записи давления; 6 — электромагнитный клапан; 7 — огнепреградитель; 8 — смеситель; 9 — предохранительный клапан; 10 — ртутный манометр; 11 — гребенка с кранами; 12 — насос-мешалка

Установка состоит из электропечи 1 с двумя термопарами 2 и сосудом 3, имеющим два штуцера. Один штуцер подсоединен к датчику давления 4 с блоком записи давления 5, второй — к электромагнитному клапану 6 для быстрого впуска смеси из смесителя 8 через огнепреградитель 7 в реакционный сосуд 3. В смеситель 8, имеющий предохранительный клапан 9, через гребенку 11 попадают компоненты газовой смеси, парциальное давление которых измеряется манометром 10. Однородность смеси в смесителе поддерживается мешалкой 12. Перед испытанием печь нагревают до требуемой температуры и через открытый клапан вакуумируют всю систему до остаточного давления 400—700 Па. Затем, перекрыв клапан 6, подготавливают в смесителе испытываемую смесь, далее, открыв клапан 6, впускают ее в реакционный сосуд 3. За эффектом самовоспламенения наблюдают визуально через смотровое стекло. Если в течение 5 мин самовоспламенение не произойдет, опыт прекращают и готовят новый нагрев сосуда до более высокой температуры. Так продолжают до определения температуры самовоспламенения испытываемой газовой смеси.

За температуру самовоспламенения принимают температуру стенок реакционного сосуда 3, при которой после установления нормального давления горючей смеси наблюдается самовоспламенение.

Температура самовоспламенения жидкостей и газов определяется в соответствии с ГОСТ Р 51330.5—99 (МЭК 60079-4—75) в печи, вы-

полненной во взрывозащитном исполнении (рис. 1.9). Метод прост: в предварительно нагретую открытую колбу 5, заполненную воздухом, помещают пробу. Испытания проводят несколькими пробами с различными температурами колбы и объемами, отличающимися на $0,05\text{--}0,2\text{ см}^3$ для жидких и на $4\text{--}5\text{ см}^3$ для газообразных проб. Наименьшую температуру колбы, при которой происходит самовоспламенение, принимают в качестве температуры самовоспламенения. Более подробное описание этой методики, подготовки оборудования (печи, термопар) и жидких или газообразных проб представлено в ГОСТ Р 51330.5—99 (МЭК 60079-4—75) (часть 4).

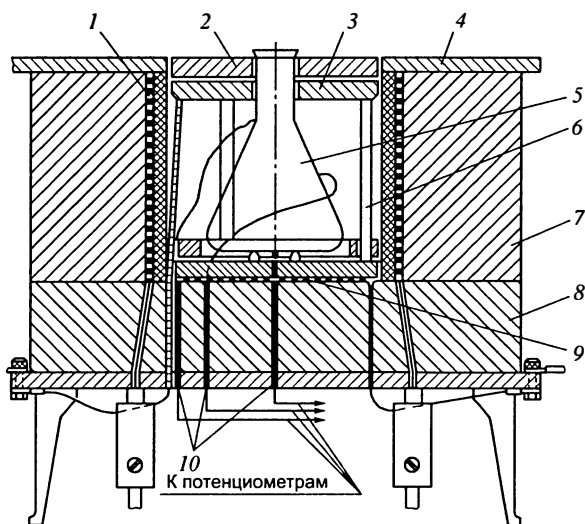


Рис. 1.9. Установка для определения стандартной температуры самовоспламенения: 1 — основной нагреватель; 2 — кольцо крышки; 3 — обогреватель горловины; 4 — крышка из огнеупорного материала; 5 — колба вместимостью 200 см^3 ; 6 — керамическая опора; 7 — поддерживающий цилиндр; 8 — электрический тигель печи; 9 — основной нагреватель; 10 — термопары

Температуру самовоспламенения *газов, жидкостей и плавящихся твердых веществ* измеряют на установке, схема которой показана на рис. 1.10.

Основной частью установки является реакционный сосуд (коническая колба Кн-250) 3, помещенный в воздушный термостат 5. Внутри камеры расположен нагреватель 2 мощностью $1,5\text{ кВт}$. Равномерность нагрева стенок колбы обеспечивается циркуляцией воздуха в

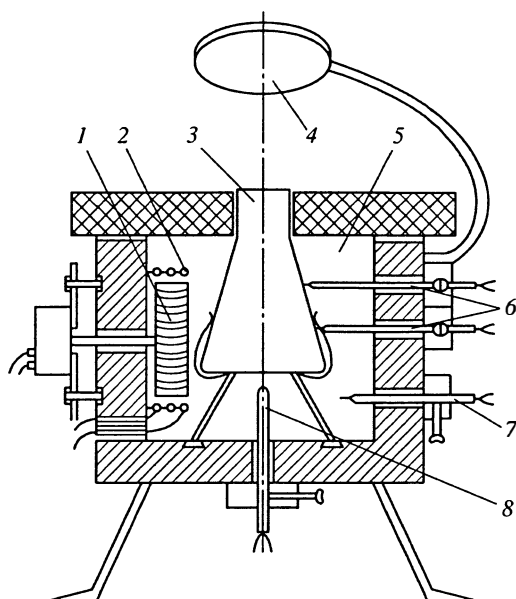


Рис. 1.10. Прибор для измерения стандартной температуры самовоспламенения СТС-2:

1 — крыльчатка вентилятора; 2 — спиральный нагреватель; 3 — реакционный сосуд; 4 — смотровое зеркало; 5 — термостат; 6—8 — термопары

термостате, создаваемой вентилятором 1, и применением регулятора температуры, позволяющего плавно изменять подводимую к нагревателю энергию.

Определение температуры самовоспламенения состоит из предварительных и основных испытаний. В предварительных испытаниях определяют наиболее легко воспламеняющееся количество вещества, вводимого в реакционный сосуд. В серии основных испытаний выявляют наименьшую температуру реакционного сосуда, при которой наблюдается самовоспламенение наиболее легко самовоспламеняющегося количества вещества. Температуру самовоспламенения находят для 6—8 проб исследуемого вещества, различающихся по объему на 0,05—2,0 см³, и строят график зависимости температуры самовоспламенения от величины пробы вещества.

Основные испытания (пять проб) на самовоспламенение проводят с наиболее легко самовоспламеняющимся количеством вещества, при температуре на 5 °С ниже минимальной температуры самовоспламенения, полученной в серии предварительных испытаний.

За температуру самовоспламенения исследуемого вещества принимают среднее арифметическое двух температур, различающихся на 5 °С, при одной из которых наблюдается самовоспламенение наиболее легко самовоспламеняющегося количества вещества, а при другой — отказ.

Температуру самовоспламенения твердых веществ измеряют на установке ОТП (см. рис. 1.6). Для этого устанавливают температуру рабочей камеры равной температуре разложения вещества или (если она неизвестна) 500 °С. После установления в рабочей камере стационарного температурного режима держатель извлекают из рабочей камеры, в контейнер помещают образец и возвращают держатель в исходное положение. Наблюдают за образцом в рабочей камере через смотровое зеркало.

Если образец самовоспламенится, то следующее испытание проводят с новым образцом при более низкой (например, на 50 °С) температуре. Если же в течение 30 мин образец не самовоспламенился, опыт прекращают и считают, что получили отказ. Следующее испытание с новым образцом проводят при более высокой температуре. Изменяя температуру в рабочей камере, определяют такую минимальную температуру, при которой возникает пламенное горение образца при двукратном повторении испытаний, а при температуре на 10 °С ниже наблюдаются два отказа. За температуру самовоспламенения принимают среднее арифметическое этих определений.

1.9. Вспышка и воспламенения жидкостей

При процессе горения паров жидкостей наблюдается такое явление, как вспышка.

Вспышка — быстрое сгорание паров или газов горючей смеси, не сопровождающееся устойчивым горением. Температура при таком процессе горения называется температурой вспышки.

Температура вспышки — минимальная температура жидкости, при которой в условиях специальных испытаний происходит воспламенение паров жидкости при кратковременном воздействии высокоэнергетического источника зажигания без последующего перехода горения в стационарный диффузионный режим.

Температура вспышки обозначается $T_{всп}$ и измеряется в °С, К.

Температура вспышки принята за основу классификации жидкостей на легковоспламеняющиеся (ЛВЖ) и горючие жидкости (ГЖ). К ЛВЖ относятся жидкости, имеющие температуру вспышки в закрытом сосуде $61\text{ }^{\circ}\text{C}$ и ниже, к горючим — с температурой вспышки более $61\text{ }^{\circ}\text{C}$.

1.9.1. Методы расчета температуры вспышки

Температуру вспышки можно рассчитать. Наиболее распространенным и достаточно точным является расчет температур вспышки и воспламенения по формуле В.И. Блинова:

$$T_{\text{всп(в)}} = \frac{A}{p_{\text{н.п}} Dn}, \quad (1.34)$$

где $T_{\text{всп(в)}}$ — температура вспышки (воспламенения);

$p_{\text{н.п}}$ — давление насыщенного пара при температуре вспышки (воспламенения);

D — коэффициент диффузии паров горючего вещества;

n — стехиометрический коэффициент при кислороде — количество молей кислорода, необходимое для полного окисления 1 моля горючего вещества;

A — константа метода определения, приведенная ниже:

Температура, К:	Значение параметра A , $\text{м}^2 \cdot \text{К} \cdot \text{Па}$:
Вспышка в закрытом тигле	28
Вспышка в открытом тигле	45,3
Воспламенение	53,3

Коэффициенты диффузии некоторых газов и паров при нормальных условиях (D_0) приведены в табл. 10 прил. III. Однако существует и метод расчета коэффициентов диффузии, которые определяют по формуле

$$D_0 = \frac{10^{-4}}{\sqrt{\sum \Delta M_i \mu_i}}, \quad (1.35)$$

где D_0 — коэффициент диффузии, $\text{м}^2/\text{с}$;

μ_i — количество i -го химического элемента в молекуле горючего вещества;

ΔM_i — атомные (элементные) составляющие горючего вещества (табл. 1.7).

Таблица 1.7. Элементные составляющие горючего вещества

Наименование элемента	Значение ΔM_i
Углерод (С)*	25—50
Водород (Н)	1
Кислород (О)	17
Азот (N)	16
Сера (S)	48
Хлор (Cl)	37
Бром (Br)	79
Йод (J)	104
Фтор (F)	16

* *Примечание.* Значение ΔM_i зависит от числа атомов углерода и их положения в молекуле горючего:

- 1) $\Delta M = 25$ — для атомов углерода, входящих в ароматический цикл;
- 2) $\Delta M = 25 + 3C$ — для атомов углерода в открытой цепи, если их количество меньше или равно восьми (С, 8);
- 3) $\Delta M = 50$ для атомов углерода в открытой цепи при $C > 8$;
- 4) $\Delta M = 25 + 2C$ — для атомов углерода, входящих в неароматический цикл при $C < 8$;
- 5) $\Delta M = 42$ — для атомов углерода, входящих в неароматический цикл, если $C > 8$.

При температуре, отличающийся от нормальной, коэффициент диффузии D может быть рассчитан по соотношению:

$$D = D_0 \left(\frac{T}{273} \right)^n, \quad (1.36)$$

где n — показатель, значение которого приведено в табл. 10 прил. III.

Методы расчета температуры вспышки индивидуальных жидкостей в закрытом тигле

Температуру вспышки жидкостей ($T_{всп}$) в °С, имеющих нижеперечисленные виды связей (табл. 1.8), вычисляют по формуле

$$T_{всп} = a_0 + a_1 t_{кип} + \sum_{j=2}^n a_j l_j, \quad (1.37)$$

где a_0 — размерный коэффициент, равный $-73,14$ °С;
 a_1 — безразмерный коэффициент, равный $0,659$;

$t_{\text{кип}}$ — температура кипения исследуемой жидкости, °С;
 a_j — эмпирические коэффициенты, приведенные в табл. 1.8;
 l_j — количество связей вида j в молекуле исследуемой жидкости.

Средняя квадратическая погрешность расчета (δ) по формуле (1.37) составляет 13 °С.

Таблица 1.8. Коэффициенты a_j для различных видов связи в молекуле жидкости

Вид связи	a_j , °С
C—C	-2,03
C—C аром.	-0,28
C=C	1,72
C—H	1,105
C—O	2,47
C=O	11,66
C—F	3,33
C—Cl	15,11
C—Br	19,40
O—H	23,90

Для некоторых алканов, галогеналканов, ароматических углеводородов, перечисленных в табл. 1.9, температуру вспышки в °С вычисляют по следующей формуле:

$$T_{\text{всп}} = a + bt_{\text{кип}},$$

где a , b — эмпирические коэффициенты, приведенные в табл. 1.9 вместе со средними квадратическими погрешностями расчета δ .

Таблица 1.9. Коэффициенты a , b для различных классов соединений

Класс веществ	Коэффициенты		δ , °С
	a , °С	b	
Алканы	-73,22	0,693	1,5
Спирты	-41,69	0,652	1,1
Ароматические углеводороды	-67,83	0,665	3,0
Бромалканы	-49,56	0,665	2,2
Хлоралканы	-55,70	0,631	1,7

Если для исследуемой жидкости известна зависимость давления насыщенного пара от температуры, то температуру вспышки в °С вычисляют по формуле

$$T_{\text{всп}} = \frac{A_{\text{Б}}}{p_{\text{всп}} D_0 \beta} - 273, \quad (1.38)$$

где $A_{\text{Б}}$ — константа, равная $280 \text{ кПа} \cdot \text{см}^2 \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{К}$;

$p_{\text{всп}}$ — парциальное давление пара исследуемой жидкости при температуре вспышки, кПа;

D_0 — коэффициент диффузии пара в воздухе, $\text{см}^2 \cdot \text{с}^{-1}$;

β — стехиометрический коэффициент кислорода в реакции горения, определяемый по формуле

$$\beta = m_{\text{C}} + m_{\text{S}} + 0,25(m_{\text{H}} - m_{\text{X}}) - 0,5m_{\text{O}} + 2,5m_{\text{P}}, \quad (1.39)$$

где m_{C} , m_{S} , m_{H} , m_{X} , m_{O} , m_{P} — число атомов соответственно углерода, серы, водорода, галоида, кислорода и фосфора в молекуле жидкости.

Средняя квадратическая погрешность расчета по формуле (1.38) составляет 13 °С.

Простым, но менее точным, является расчет температуры вспышки в закрытом тигле по *форме Элея*:

$$T_{\text{всп}} = t_{\text{кип}} - 18\sqrt{k}, \quad (1.40)$$

где k — коэффициент, определяемый по формуле

$$k = 4m_{\text{C}} + m_{\text{H}} + 4m_{\text{S}} + m_{\text{N}} - 2m_{\text{O}} - 2m_{\text{Cl}} - 3m_{\text{F}} - 5m_{\text{Br}},$$

где m_{C} , m_{H} , m_{S} , m_{N} , m_{O} , m_{Cl} , m_{F} , m_{Br} — количество элементов углерода, водорода, серы, азота, кислорода, хлора, фтора, брома в молекуле горючего вещества.

Температура вспышки в закрытом тигле может быть определена по нижнему температурному пределу воспламенения t_{H} :

$$T_{\text{всп}} = \frac{t_{\text{H}} + 2}{0,875}.$$

Это выражение применимо, если $0 < T_{\text{всп}} < 160 \text{ °С}$.

Методы расчета температуры вспышки индивидуальных жидкостей в открытом тигле

Температуру вспышки в открытом тигле вычисляют по формуле (1.37), используя величины эмпирических коэффициентов из табл. 1.10.

Таблица 1.10. Коэффициенты a_j для различных видов связи в молекуле жидкости

Вид связи	$a_j, ^\circ\text{C}$
C—C	3,63
C—C аром.	6,48
C=C	-4,18
C—H	0,35
C—O	4,62
C=O	25,36
O—H	44,29

Коэффициенты a_0 и a_1 при расчете температуры вспышки в открытом тигле равны соответственно $-73 ^\circ\text{C}$ и $0,049$.

Средняя квадратическая погрешность расчета составляет $10 ^\circ\text{C}$.

Если для исследуемой жидкости известна зависимость давления насыщенного пара от температуры, то температуру вспышки в открытом тигле вычисляют по формуле (1.38), где $A_B = 427 \text{ кПа} \cdot \text{см}^2 \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{К}$.

Средняя квадратическая погрешность расчета составляет $13 ^\circ\text{C}$.

1.9.2. Методы расчета температуры воспламенения жидкостей

Температуру воспламенения (T_B) индивидуальных жидкостей в $^\circ\text{C}$ вычисляют по формуле (1.37), где a_0 — размерный коэффициент, равный $-47,78 ^\circ\text{C}$; a_1 — безразмерный коэффициент, равный $0,882$; a_j — эмпирические коэффициенты, приведенные в табл. 1.11.

Средняя квадратическая погрешность расчета составляет $5 ^\circ\text{C}$.

Если известна зависимость давления насыщенных паров от температуры жидкости, то температуру воспламенения индивидуальных жидкостей, состоящих из атомов C, H, O, N, вычисляют по формуле

$$T_B = \frac{A_B}{p_B D_0 \beta} - 273, \quad (1.41)$$

Таблица 1.11. Коэффициенты a , для различных видов связи в молекуле жидкости

Вид связи	$a_j, ^\circ\text{C}$
C—C	0,027
C—C аром.	-2,069
C=C	-8,980
C—H	-2,118
C—O	-0,111
C=O	-0,826
O—H	8,216

где A_B — константа, равная $453 \text{ кПа} \cdot \text{см}^2 \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{К}$ (для фосфорорганических веществ $A_B = 1333 \text{ кПа} \cdot \text{см}^2 \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{К}$);

p_B — парциальное давление пара исследуемой жидкости при температуре воспламенения, кПа;

D_0 — коэффициент диффузии пара в воздухе при нормальных условиях, $\text{см}^2 \cdot \text{с}^{-1}$;

β — стехиометрический коэффициент кислорода в реакции горения, определяемый по формуле (1.39);

Средняя квадратическая погрешность расчета составляет 6°C .

Температуру воспламенения алифатических спиртов и сложных эфиров вычисляют по формуле

$$T_B = -\frac{t_{\text{кип}} + 273}{1 + K(t_{\text{кип}} + 273)} - 273, \quad (1.42)$$

где K — эмпирический коэффициент, равный $6 \cdot 10^{-4}$ для спиртов и $7 \cdot 10^{-4}$ для сложных эфиров.

Средняя квадратическая погрешность расчета составляет 2°C для спиртов и 4°C для сложных эфиров.

1.9.3. Методы определения температуры вспышки

Для определения температуры вспышки заданную массу горючего вещества нагревают с заданной скоростью, периодически зажигая выделяющиеся пары и визуально оценивая результаты зажигания.

Температуру вспышки экспериментально определяют в приборах закрытого (з. т.) и открытого (о. т.) типов.

Жидкость помещают в сосуд, нагревают с определенной скоростью, периодически зажигают выделяющиеся пары и визуально оценивают результат зажигания. Температура вспышки ($t_{всп}$), измеренная в приборе открытого типа, как правило выше: для жидкостей с температурой кипения до 100 °С на 1—3 °С, до 250 °С на 10—15 °С.

В табл. 1.12 приведены значения температур вспышки некоторых жидкостей, определенных приборами закрытого и открытого типов.

Таблица 1.12. Температура вспышки некоторых видов топлива

Жидкость	Температура вспышки, К	
	Прибор закрытого типа (з. т.)	Прибор открытого типа (о. т.)
Нефть	303	319
Мазут	369	382
Масло цилиндровое	488	509

Низкокипящие горючие жидкости имеют обычно низкую $t_{всп}$, например: для этиловой эфира 43 °С, для ацетилена 18 °С. Высококипящие жидкости имеют высокие $t_{всп}$, например: глицерин 198 °С, дециловый спирт 107 °С.

Схема прибора закрытого типа показана на рис. 1.11. В качестве реакционного сосуда используют металлический тигель 5 с внутренним диаметром 51 мм и высотой 56 мм. Тигель закрыт крышкой 4, на которой расположены: зажигательное устройство 1, заслонка 2 с поворотным устройством и мешалка 6. Тигель, крышку и мешалку изготавливают из материалов, не вступающих в химическое взаимодействие с испытуемыми веществами, например, из нержавеющей стали.

Перед проведением измерений образцы легколетучих жидкостей с температурой кипения до 100 °С охлаждают до 0 °С, образцы вязких жидкостей нагревают до текучести. Вначале выполняют предварительное испытание для получения ориентировочного значения температуры вспышки. Затем проводят серию основных испытаний на трех образцах исследуемой жидкости. Образцы жидкостей, имеющих ориентировочную температуру вспышки менее 50 °С, охлаждают до температуры, которая на 17 °С меньше ориентировочной температуры вспышки. За 10 °С до ориентировочной температуры вспышки образец нагревают со скоростью 1 °С/мин для жидкостей с температур-

ной вспышки до 104 °С и со скоростью 2 °С/мин для жидкостей с температурой вспышки более 104 °С .

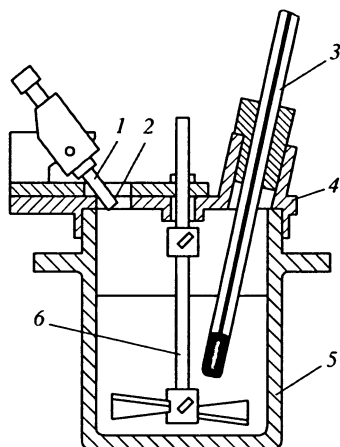


Рис. 1.11. Прибор закрытого типа для измерения температуры вспышки: 1 — зажигательное устройство; 2 — заслонка; 3 — термометр; 4 — крышка; 5 — тигель; 6 — мешалка

За температуру вспышки принимают среднее арифметическое трех определений серии основных испытаний с поправкой на барометрическое давление, вычисляемое по формуле

$$\Delta t = \frac{101,3 - p_{\text{атм}}}{3,3} 0,9,$$

где $p_{\text{атм}}$ — давление в период проведения опыта, кПа. Вычисленную поправку следует прибавлять к измеренной величине температуры вспышки.

Схема прибора открытого типа показана на рис. 1.12. Прибор состоит из фарфорового тигля низкой формы 3, нагревательной воздушной ванны 1, газовой горелки 8 и термометра 4.

Подготовку образцов и определение ориентировочной температуры вспышки проводят так же, как и в приборе закрытого типа. После этого выполняют серию основных испытаний на трех образцах исследуемого вещества в той же последовательности, что и предварительные испытания. Образцы исследуемого вещества, имеющие ориентировочную температуру вспышки менее 50 °С, охлаждают до температуры, которая на 17 °С ниже ориентировочной температуры вспышки.

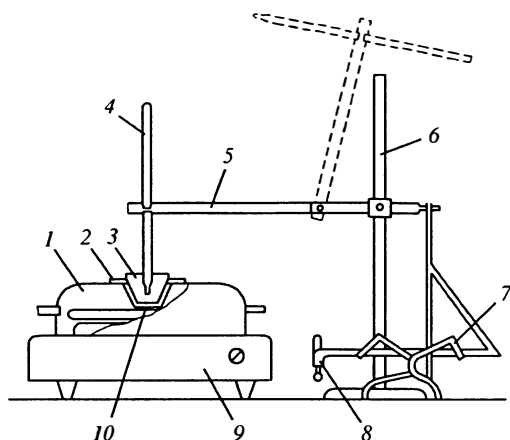


Рис. 1.12. Прибор открытого типа для измерения температуры вспышки:

1 — нагревательная ванна; 2 — кольцо из паронита; 3 — фарфоровый тигель; 4 — термометр; 5 — держатель термометра; 6 — штатив; 7 — подставка для горелки; 8 — газовая горелка; 9 — нагревательное устройство; 10 — асбестовая прокладка

За $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ до ориентировочной температуры вспышки образец нагревают со скоростью $1\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{мин}$ для веществ с температурой вспышки до $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $2\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{мин}$ для веществ с температурой вспышки более $70\text{ }^{\circ}\text{C}$. Испытания на вспышку проводят при повышении температуры на каждые $1\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{мин}$ для веществ с температурой вспышки до $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $2\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{мин}$ для веществ с температурой вспышки более $70\text{ }^{\circ}\text{C}$. За температуру вспышки каждого определения принимают показание термометра, соответствующее появлению пламени над частью или над всей поверхностью образца.

Обработку результатов проводят так же, как и при определении температуры вспышки в приборе закрытого типа.

1.10. Пределы воспламенения горючей смеси

1.10.1. Концентрационные пределы воспламенения газовых смесей

Горючие и легковоспламеняющиеся жидкости, испаряясь, образуют паровоздушные смеси. Эти смеси при наличии источника зажигания могут воспламеняться, и тогда паровоздушная смесь становится взрывоопасной.

Взрывоопасность горючей смеси возникает тогда, когда количество газов или паров в воздухе составляет определенные величины (не больше и не меньше). Эти величины определяют концентрационные пределы воспламенения.

Пределы воспламенения — это предельные концентрации горючего вещества в воздухе или другой окислительной среде, при которых еще возможно распространение пламени по всей горючей смеси от источника зажигания.

Концентрационные пределы воспламенения обозначаются КПВ. Концентрационные пределы воспламенения называют также **пределами взрываемости**.

Различают **нижний (НКПВ)** и **верхний (ВКПВ)** пределы, характеризуемые соотношением минимального и максимального содержания горючего вещества в смеси.

Рассмотрим, в чем заключается сущность этих понятий.

На производствах могут образовываться любые смеси горючего газа или пара с воздухом. Особенно часто с этим приходится сталкиваться при получении водорода, на ацетиленовых станциях, в цехах рекуперации и ректификации органических растворителей, в цехах стержневой полимеризации синтетического каучука, на складах баллонов с горючими газами и др. Концентрация горючего в этих смесях может изменяться от долей процента почти до 100 %.

Однако не все эти концентрации взрыво- или пожароопасны.

Рисунок 1.13 иллюстрирует условия воспламенения горючих смесей. На горизонтальной оси отложены возможные концентрации го-

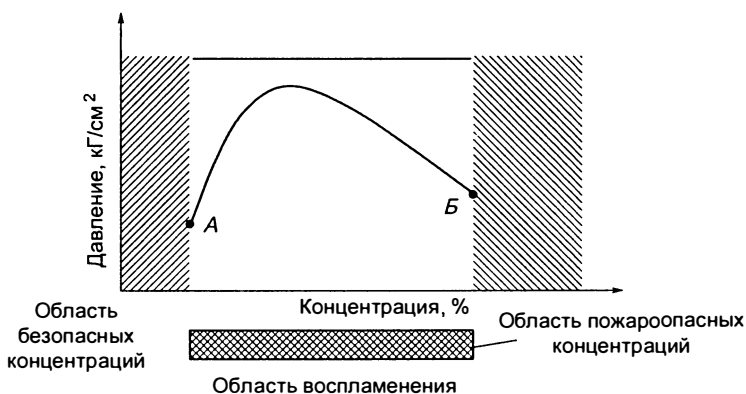


Рис. 1.13. Зависимость давления горючих газо-, паровоздушных смесей от концентрации горючего вещества в смеси с воздухом

рючих газов и паров в смеси с воздухом, а на вертикальной оси — давления при взрывах горючих газов и паров с воздухом. Все смеси горючего с воздухом до точки *A* не способны воспламеняться даже от мощной электрической искры — это область безопасных концентраций. Только в точке *A* смесь горючего с воздухом способна воспламеняться и сгорать со скоростью взрыва с распространением пламени на весь объем горючей смеси.

Та минимальная концентрация горючих газов или паров, при которой смесь воспламеняется от постороннего источника зажигания, является нижним концентрационным пределом воспламенения (НКПВ).

Нижний концентрационный предел воспламенения (НКПВ) — это наименьшая концентрация горючих паров, газов или пыли в смеси с воздухом, при которой смесь уже может воспламеняться от источника зажигания и пламя распространяется на весь объем горючей смеси.

При концентрации горючего в смеси выше нижнего концентрационного предела воспламенения (за точкой *A*) горение происходит с большей скоростью, давление повышается и происходит взрыв. Это объясняется тем, что по мере увеличения содержания горючего содержания воздуха уменьшается, теплота, выделившаяся в результате химической реакции, меньше расходуется на нагрев не участвующего в реакции избытка воздуха.

Недостаток воздуха в смесях, богатых горючим, ведет к тому, что смесь может терять способность воспламеняться. Для различных смесей концентрация горючего, при которой смесь уже не способна воспламеняться, не одинакова. Например, для смеси оксида углерода с воздухом наивысшей концентрацией CO, при которой еще возможно воспламенение, является 74 % оксида углерода (точка *B*, рис. 1.13). Выше этой концентрации никакие смеси оксида углерода с воздухом воспламеняться не могут, хотя в них присутствует некоторое количество воздуха.

Та наивысшая концентрация горючих газов или паров, при которой смесь еще воспламеняется от постороннего источника зажигания, является верхним концентрационным пределом воспламенения (ВКПВ).

Верхний концентрационный предел воспламенения (ВКПВ) — это наибольшая концентрация горючих паров, газов или пыли в смеси с воздухом, при которой смесь еще способна воспламеняться от источника зажигания с распространением пламени на весь ее объем.

Верхний концентрационный предел воспламенения характеризуется избытком горючего и малым количеством воздуха. При воспла-

менении такой газовой смеси часть тепла химической реакции расходуется на нагрев не участвующего в реакции горючего, поэтому продукты горения нагреваются не до максимальной температуры, при этом давление может составлять 3—4 кг/см², что грозит опасностью взрыва.

Смесь воздуха с горючим газом, паром или пылью на нижнем концентрационном пределе воспламенения содержит избыток воздуха, а при верхнем концентрационном пределе — недостаток воздуха.

Интервал концентраций газов или паров в воздухе между нижним и верхним концентрационными пределами воспламенения называется **областью воспламенения**. Область воспламенения газов (паров) в воздухе определяется при атмосферном давлении 760 мм рт. ст. (0,1 МПа) и характеризуется тем, что внутри нее все смеси горючего с воздухом способны воспламениться от внешнего источника зажигания с последующим распространением горения на весь объем смеси.

Область воспламенения обозначается φ_v . Для области воспламенения справедливо выражение:

$$\text{НКПВ} \leq \varphi_v \leq \text{ВКПВ}.$$

Смесь воздуха с горючим газом или паром на нижнем концентрационном пределе воспламенения содержит избыток воздуха, количество которого зависит от конкретного горючего вещества. Так, для смеси воздуха с метаном коэффициент избытка воздуха равен 2, с оксидом углерода — 2,6, с сероуглеродом — 6,9 и т. д.

Смесь, имеющая небольшое количество горючего и избыток воздуха, характеризуется минимальной скоростью распространения пламени в объеме всего сосуда, низкой температурой горения — порядка 1250—1300 °С и небольшим давлением взрыва (около 3 кг/см²).

Область воспламенения различных газовых и паровоздушных смесей не одинакова. Наибольшая область воспламенения характерна для оксида этилена, водорода, ацетилен и др. Наименьшая — для бензина, керосина, пропана, бутана и других веществ. Чем меньше нижний концентрационный предел воспламенения и больше область воспламенения газов, тем они представляют большую взрыво- и пожарную опасность.

Если концентрация горючих веществ в смеси с воздухом превышает НКПВ, то такая смесь называется пожароопасной.

Знание областей безопасных и пожароопасных концентраций дает возможность в процессе применения и хранения газов и горючих жидкостей поддерживать такой режим, при котором концентрации

горючего были бы выше верхнего или ниже нижнего концентрационных пределов воспламенения. Это достигается созданием соответствующих давлений и температур в аппаратах, хранилищах и различных емкостях. Концентрационные пределы используют при расчете допустимых концентраций газов внутри взрывоопасного технологического оборудования, систем рекуперации, вентиляции и т. п., а также при расчете предельно допустимой, взрывоопасной концентрации горючего газа, при работе с огнем, при классификации производств, связанных с синтезом, применением или хранением горючих газов, по степени пожарной опасности. При определении пожарной опасности технологических процессов необходимо учитывать изменение пределов воспламенения смеси в зависимости от ряда факторов.

Концентрационные пределы воспламенения зависят от следующих факторов:

- температуры смеси;
- давления смеси;
- объема и диаметра сосуда.

Температура смеси

Начальная температура горючей смеси влияет на пределы воспламенения. С повышением температуры увеличивается скорость химической реакции, и область воспламенения расширяется. Наиболее сильное влияние оказывает температура на верхний концентрационный предел воспламенения (ВКПВ). По мере повышения температуры от 10 до 450 °С, например, аммиачно-воздушной смеси при атмосферном давлении нижний концентрационный предел воспламенения

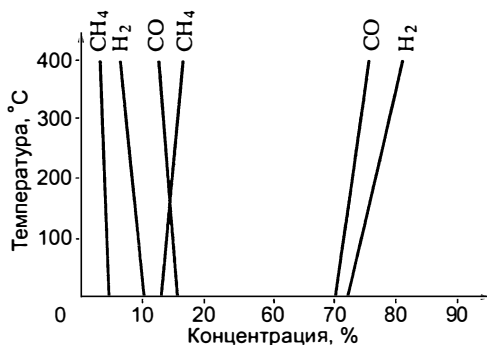


Рис. 1.14. Концентрационные пределы воспламенения, %

ния (НКПВ) снижается с 18 до 14,5 % аммиака, а ВКПВ возрастает с 25,5 до 32 % аммиака в составе воздушной смеси. Аналогичные результаты получены для смесей воздуха с водородом, окисью углерода, метаном и представлены на графике (рис. 1.14), а также ацетиленом, этиленом и пентаном и другими смесями.

С повышением начальной температуры горючей смеси увеличивается скорость горения при предельных концентрациях этих смесей. Смеси, сильно разбавленные горючим или воздухом и неспособные гореть при низких температурах, напротив, становятся горючими при высоких температурах.

Давление смеси

Начальное давление горючей смеси влияет существенным образом на концентрационные пределы воспламенения горючей смеси. КПВ меняются вследствие изменения скорости распространения горения при повышении давления. Горючие смеси при повышении давления ведут себя по-разному, так как их физико-химические свойства различны. С повышением давления область воспламенения расширяется, главным образом, за счет повышения ВКПВ. Например, при давлении 10^5 Па (1 атм.) НКПВ метана составляет 5,6 %, тогда как ВКПВ — 14,3 %. При давлении $12,5 \cdot 10^5$ Па (125 атм.) НКПВ = 5,7 % (т. е. практически не изменился), а ВКПВ = 45,7 %. Произошло изменение ВКПВ больше, чем в три раза. Установлено, что для всех газовых смесей сужение пределов воспламенения наблюдается только при понижении давления. Наиболее типичная кривая зависимости изменения пределов воспламенения от давления представлена графиком рис. 1.15. Кривая имеет минимум, который показывает, что для каждой газовой горючей смеси существует минимальное давление, ниже которого при любом составе этой смеси возгорание невозможно. Наличие такой точки с минимальным давлением связано с тем, что по мере понижения давления ВКПВ и НКПВ сближаются и затем совпадают. Зажигание газо-, паровоздушной смеси ниже минимального значения давления невозможно.

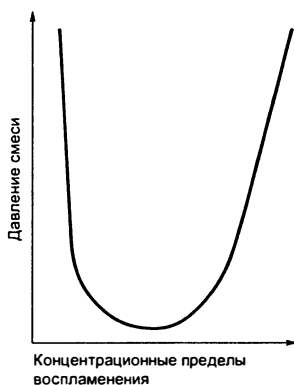


Рис. 1.15. Зависимость концентрационных пределов воспламенения от давления смеси

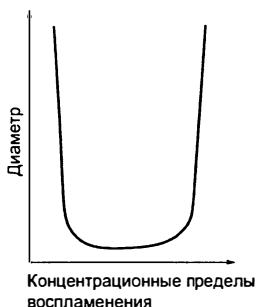


Рис. 1.16. Зависимость концентрационных пределов воспламенения газоздушных смесей от диаметра сосуда

Размеры сосуда

При уменьшении объема сосуда и его диаметра увеличивается поверхность теплоотдачи, приходящейся на единицу объема смеси. Для газовой системы существуют объем и диаметр, ниже которых при любом составе смеси зажигание и распространение горения становятся невозможными. На рис. 1.16 показана зависимость КПВ от размера сосуда.

Концентрационные пределы воспламенения некоторых горючих веществ представлены в табл. 11—13 прил. III.

1.10.2. Температурные пределы воспламенения

Взрываемость паровоздушных смесей зависит не только от концентрации компонентов этих смесей, но и от температурного режима.

Температура, при которой создается концентрация газов, паров, равная НКПВ, называется нижним температурным пределом воспламенения (НТПВ). НТПВ называют на практике температурой вспышки.

Существует также верхний температурный предел воспламенения (предел взрываемости).

Температура, при которой создается концентрация паров и газов, равная ВКПВ, называется верхним температурным пределом воспламенения (ВТПВ).

Температурные пределы для различных веществ различны и зависят от их физико-химических свойств. Например, для ацетона НТПВ равен $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$, а ВТПВ равен $+13\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Температурные пределы воспламенения используются для оценки горючести и пожарной опасности смесей (табл. 13, прил. III).

1.10.3. Методы расчета температурных пределов воспламенения

Температурные пределы могут быть рассчитаны. Расчетный метод заключается в следующем. Первоначально вычисляют давление p_n

и p_B (мм рт. ст.) насыщенного пара, соответствующее нижнему и верхнему температурным пределам воспламенения:

$$p_H = 768/4,76 (n - 1) + 1;$$

$$p_B = 3040/4,76 n + 4,$$

где n — число атомов кислорода, необходимое для полного сгорания одной молекулы горючего вещества.

Далее по значению давления находят температурные пределы по справочным данным в зависимости давления насыщенного пара от температуры (табл. 14, прил. III).

Температурные пределы воспламенения (ТПВ) жидкостей рассчитывают по температуре кипения:

$$t_{H(B)} = k t_{\text{кип}} - l,$$

где $t_{H(B)}$ — нижний (верхний) температурный предел воспламенения;

$t_{\text{кип}}$ — температура кипения, °С;

k, l — константы для определенных групп (гомологических рядов) жидкостей (табл. 15, прил. III).

В случае если неизвестна температура кипения исследуемого вещества при нормальном атмосферном давлении, значение нижнего температурного предела распространения пламени t_H вычисляют по формуле

$$t_H = t_{\text{всп}} - C,$$

где $t_{\text{всп}}$ — экспериментальное значение температуры вспышки, °С;

C — константа, равная 2 °С, если для расчета используют значение $t_{\text{всп}}$ в закрытом тигле, и равная 8 °С, если для расчета используют значение $t_{\text{всп}}$ в открытом тигле. Средняя квадратическая погрешность расчета по этой формуле не превышает 12 °С.

Температурные пределы воспламенения могут быть определены по известным значениям концентрационных пределов воспламенения:

$$p_{H(B)} = \frac{\Phi_{H(B)} p_0}{100}, \quad (1.43)$$

где $p_{H(B)}$ — давление насыщенного пара, соответствующее нижнему (верхнему) концентрационному пределу воспламенения;

$\varphi_{н(в)}$ — нижний (верхний) концентрационный предел воспламенения;

p_0 — атмосферное давление.

Определяют температуру вещества, при которой достигается данное давление по *уравнению Антуана*:

$$\lg p = A - \frac{B}{C + t}, \quad (1.44)$$

где A, B, C — константы Антуана (табл. 10, прил. III);

t — температура, °С (температурные пределы).

Температура вещества при определенном давлении приведена в табл. 14, прил. III. Эта температура будет являться соответственно нижним или верхним пределом воспламенения.

В том случае если известна зависимость давления насыщенного пара от температуры, значение нижнего или верхнего температурных пределов распространения пламени ($t_{в(н)}$) в °С вычисляют по соответствующему значению концентрационного предела распространения пламени ($\varphi_{в(н)}$) по формуле

$$t_{в(н)} = \frac{B}{A - \lg(\varphi_{в(н)} p_0 - 0,01)} - C_A, \quad (1.45)$$

где A, B, C_A — константы уравнения Антуана;

p_0 — атмосферное давление, кПа.

Значение $\varphi_{в(н)}$ может быть рассчитано по методам расчета концентрационных пределов воспламенения или принято по табл. 11—13, прил. III или формуле (1.45).

В случае если неизвестна зависимость давления насыщенного пара от температуры, для веществ, состоящих из атомов С, Н, О, N, значение нижнего или верхнего температурных пределов (t_n) вычисляют по формуле


$$t_{в(н)} = a_0 + a_1 t_{кип} + \sum_{j=2}^m a_j I_j, \quad (1.46)$$

где a_0 — размерный коэффициент, равный $-62,46$ °С для нижнего и $-41,43$ °С для верхнего пределов;

a_1 — безразмерный коэффициент, равный 0,655 для нижнего и 0,723 для верхнего пределов;

a_j — эмпирические коэффициенты, характеризующие вклад j -х структурных групп, приведены в табл. 1.13

Таблица 1.13. Коэффициенты a_i

Вид структурной группы	$a_i, ^\circ\text{C}$	
	t_n	t_v
C—C	0,909	-1,158
C=C	2,66	-4,64
C—H	0,009	0,570
C—O	0,110	1,267
C=O	5,57	5,86
O—H	19,57	17,80
	-4,40	-4,60

Среднее квадратическое отклонение расчета по формуле (1.46) составляет 9°C .

НТПВ (температура вспышки) химических соединений одного класса изменяется в зависимости от физических свойств веществ в гомологическом ряду. На примере спиртов проследим закономерности изменения температуры вспышки. Как видно из табл. 1.14, температура вспышки повышается с увеличением молекулярного веса, температуры кипения и плотности. Эти закономерности в гомологическом ряду говорят о том, что температура вспышки связана с физическими свойствами веществ и сама является **физическим параметром**. Необходимо отметить, что закономерность изменения температуры вспышки в гомологическом ряду нельзя распространять на жидкости, принадлежащие к разным классам органических соединений.

Таблица 1.14. Температура кипения и вспышки некоторых спиртов

Наименование спирта, формула	Молекуляр- ный вес	Плотность, г/м^3	Температура, $^\circ\text{C}$	
			кипения	вспышки
Метилловый CH_3OH	32	0,791	64,7	7
Этиловый $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$	46	0,789	78,4	11
н-Пропиловый $\text{C}_3\text{H}_7\text{OH}$	60	0,80	97,8	20
н-Бутиловый $\text{C}_4\text{H}_9\text{OH}$	74	0,810	118,0	31
н-Амиловый $\text{C}_5\text{H}_{11}\text{OH}$	88	0,817	137,0	46

Таким образом, температура вспышки (НТПВ) указывает на то, что при данной температуре над поверхностью жидкости образуется горючая концентрация паров. Однако при этой температуре стационарный (постоянный) процесс горения не устанавливается, так как мала скорость парообразования.

1.10.4. Методы определения концентрационных и температурных пределов воспламенения

Температурные пределы воспламенения жидкостей определяются на стандартном приборе (ТП) (рис. 1.17).

Сущность метода заключается в определении минимальной и максимальной температур, при которых образуются концентрации насыщенных паров, равные НКПВ или ВКПВ. Прибор ТП состоит из стеклянного цилиндрического реакционного сосуда *1* диаметром 65 ± 2 мм, высотой 125 ± 5 мм, электродов спирального *2* и искрового *3* зажигания, двухзонной термопары *4* в стеклянном чехле (расстояние между зонами измерения 60 ± 2 мм), термостата или криостата (на рис. 1.15 не показан), в который помещается сосуд *1*. Они обеспечивают поддержание постоянной температуры в реакционном сосуде в течение 15 мин с точностью до ± 1 °С. Количество заливаемой жидкости составляет 20 % всей емкости реакционного сосуда.

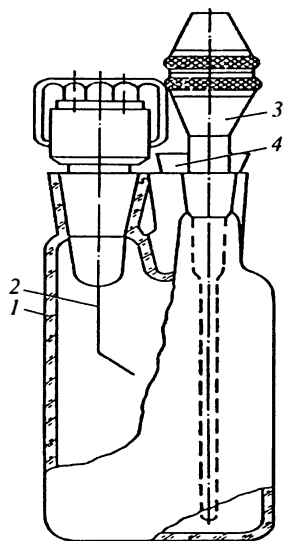


Рис. 1.17. Прибор для определения температурных пределов воспламенения (ТП):

1 — реакционный сосуд;
2 — электрод спирального зажигания; *3* — электрод искрового зажигания; *4* — двухзонная термопара

Жидкость в реакционном сосуде нагревают или охлаждают до предполагаемого температурного предела и выдерживают при этой температуре 15 мин для установления равновесия между паровой и конденсированной фазами. Причем разность температур между фазами не должна превышать одного градуса. После окончания термостатирования паровоздушную смесь воспламеняют. Распространение пламени по всему объему паровоздушного про-

странства или вертикально верх до горловины сосуда считается «воспламенением». Горение и вспышка, происходящие на спирали, появление факела пламени около электродов или выброс пробки без видимого пламени считаются «отказом».

Экспериментально концентрационные пределы индивидуальных веществ и смесей можно определить на приборе КП ВНИИПО по методике ГОСТ 13919—68 (рис. 1.18). Этот прибор называют также прибором Коварда и Джонса.

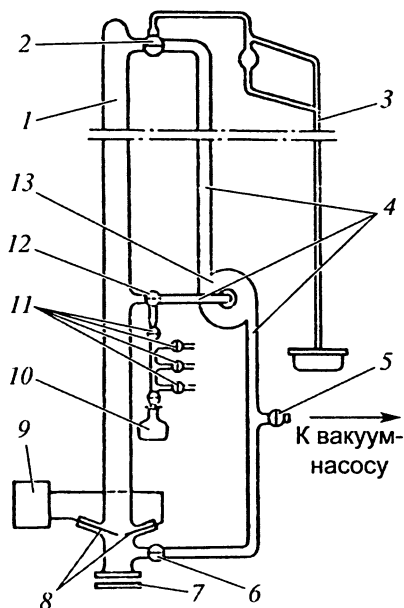


Рис. 1.18. Прибор КП для определения концентрационных пределов воспламенения:

1 — реакционный сосуд; 2, 5, 6, 11, 12 — краны; 3 — ртутный манометр; 4 — циркуляционные трубки; 7 — стеклянная пластина; 8 — электроды зажигания; 9 — высоковольтный источник питания; 10 — испаритель; 13 — насос-мешалка

Реакционный сосуд 1 представляет собой вертикальную трубку, изготовленную из термически устойчивого стекла с внутренним диаметром 50—55 мм, толщиной стенки 2 мм и высотой 1500 ± 100 мм. Сверху трубка запаяна, нижний открытый ее конец имеет шлифованную стеклянную пластинку 7. На расстоянии 100 мм от нижнего конца трубки на шлифах введены электроды зажигания 8 с искровым промежутком 5—10 мм.

Ток к электродам подают от высоковольтного источника питания 9. Для перемешивания газовой смеси предусмотрена циркуляционная система с насосом-мешалкой 13, которую перед испытанием отключают кранами 2, 12. Разрежение в приборе создается вакуум-насосом и измеряется ртутным манометром 3.

Для приготовления газовой смеси требуемого состава вакуумируют прибор вакуум-насосом до давления 5—10 мм рт. ст. и вводят рассчитанное количество горючего газа или пара, после чего заполняют систему воздухом до выравнивания давления с атмосферным. Затем смесь перемешивают 5—10 мин. Отключают кранами реакционный сосуд от циркуляционной системы и через 1—2 мин осторожно снимают шлифованную стеклянную пластинку и тотчас зажигают смесь искрой от индикатора, включенного на 2—3 с. Если при этом произошел «отказ», т. е. смесь не воспламенилась или возникшее пламя не распространилось до верха реакционного сосуда, то в последующих опытах при определении нижнего предела воспламенения концентрацию горючего компонента в смеси повышают, а при определении верхнего предела — понижают. Если же наблюдалось воспламенение и при этом пламя распространилось до верха трубы, то последующие опыты ведут соответственно с пониженным (для нижнего предела) или повышенным (для верхнего предела) концентрациями горючего компонента.

За предел воспламенения принимают среднее арифметическое двух ближайших концентраций с разницей не более 5 % определяемой величины, при одной из которых наблюдается воспламенение смеси с распространением пламени до верха реакционного сосуда, а при другой — «отказ».

Если ни при какой из концентраций горючего компонента пламя, возникшее из электродов, не распространяется до верха реакционного сосуда и гаснет после выключения источника зажигания, то такие вещества характеризуются как не имеющие области воспламенения и относятся к группе трудногорючих.

На установке Коварда и Джонса получены данные по концентрационным пределам распространения пламени большинства горючих газов. Эти данные включены в зарубежные и некоторые отечественные справочники по пожароопасности горючих веществ.

Исследованиями А.Н. Баратова с сотрудниками показано, что в приборе КП не создаются оптимальные условия для распространения пламени. Это выражается в том, что для галогенсодержащих соединений в ней получается более узкая область воспламенения, чем в сосу-

дах большого объема, а для обычных горючих точка флегматизации оказывается сдвинутой в область смесей, обогащенных окислителем. Поэтому начиная с 1984 г. измерение пределов распространения пламени газо- и паровоздушных смесей производится на установке «Предел» (рис. 1.19).

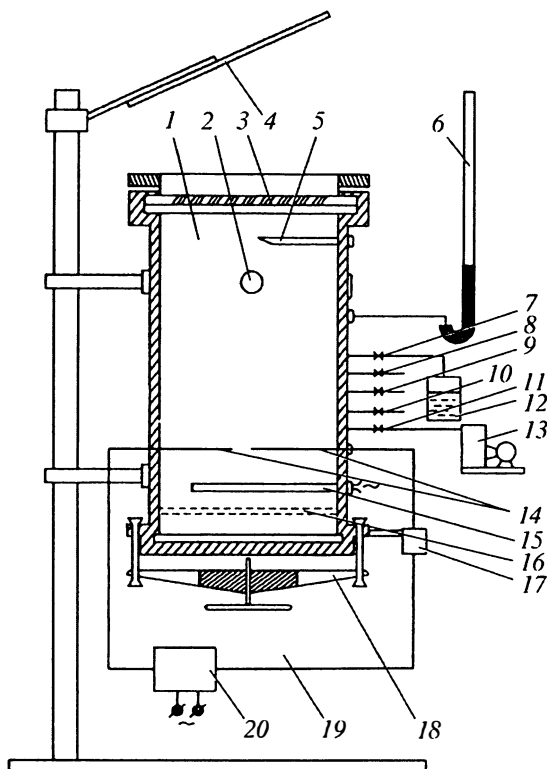


Рис. 1.19. Установка «Предел» для измерения концентрационных пределов распространения пламени:

1 — реакционный сосуд; 2 — отверстие для продувки (клапан); 3 — верхняя крышка; 4 — смотровое зеркало; 5 — термопара; 6 — ртутный манометр; 7—11 — вентили; 12 — испаритель; 13 — вакуумный насос; 14 — электроды зажигания; 15 — трубчатый электронагреватель; 16 — пакет сеток; 17 — концевой выключатель; 18 — нижняя крышка; 19 — винт; 20 — источник зажигания

Реакционный сосуд 1 установки «Предел» представляет собой цилиндр с внутренним диаметром 300 мм и высотой 800 мм. Верхняя крышка 3 выполнена из термостойкого стекла, через которое при по-

мощи зеркала 4 наблюдают за процессом распространения пламени при испытании. Порядок работы на установке «Предел» такой же, как и на приборе КП.

Составление данных по пределам воспламенения, полученных на приборе Коварда и Джонса и установке «Предел», представлены ниже:

Вещество	Прибор Каварда и Джонса		Установка «Предел»	
	C_n , % об.	C_v , % об.	C_n , % об.	C_v , % об.
Аммиак	17,1	26,7	15,7	29,8
Ацетон	3,05	12,9	2,7	13,1
Метан	5,15	14,1	5,0	15,9
Пропан	2,3	8,7	2,0	10,0
Этилен	3,15	30,0	2,95	33,3
Бромистый этил	Отсутствует	Отсутствует	6,0	10,0
Хлористый метилен	Отсутствует	Отсутствует	14,0	19,0

Нижний концентрационный предел распространения пламени (НКПР) в пылевоздушных смесях измеряют на установке, схема которой представлена на рис. 1.20. Реакционный сосуд 1 этой установки представляет собой стеклянный цилиндр внутренним диаметром 105 мм и высотой 425 мм. Цилиндр имеет контрольную отметку на высоте 300 мм и закреплен вертикально между двумя металлическими фланцами.

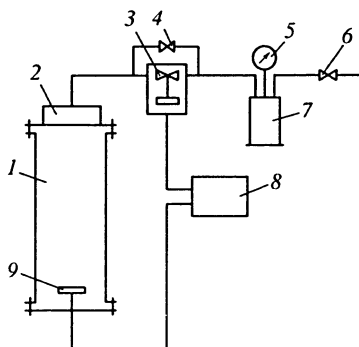


Рис. 1.20. Установка для измерения нижнего концентрационного предела распространения пламени в пылевоздушных смесях:

1 — реакционный сосуд; 2 — распылитель; 3 — электромагнитный клапан; 4, 6 — клапаны; 5 — манометр; 7 — ресивер; 8 — блок управления; 9 — источник зажигания

Методика измерения заключается в следующем. Взвешивают навеску исследуемого вещества, затем помещают навеску в распылитель 2 и герметизируют реакционный сосуд. Подают в ресивер 7 воздух до требуемого давления, устанавливают на блоке 8 продолжительность распыления, включают источник 9 зажигания и распыляют навеску, визуально фиксируют распространение пламени.

Для первого испытания используют навеску массой 0,2 г. Изменяя массу навески на 10 %, находят ее минимальное значение, при котором получают шесть последовательных воспламенений (частота воспламенения равна 1), и ее максимальное значение, при котором получают шесть последовательных отказов (частота воспламенения равна 0). На каждой промежуточной навеске проводят по шесть испытаний.

За воспламенение принимают горение пылевоздушной смеси с распространением пламени от источника зажигания до контрольной отметки на реакционном сосуде или выше ее.

НКПР рассчитывают по формуле (в г/м³):

$$\text{НКПР} = \frac{M_x}{V} K_n,$$

где M_x — математическое ожидание величины навески, соответствующей НКПР;

V — вместимость реакционного сосуда;

K_n — поправочный коэффициент.

Математическое ожидание величины навески рассчитывают по методу Спирмена — Кербера:

$$M_x = b - d (S_i - 0,5),$$

где b — минимальное значение массы навески с частотой воспламенения, равной 1, г;

d — величина изменения навески, г;

S_i — сумма частот воспламенений во всей области неустойчивого воспламенения.

Величину поправочного коэффициента рассчитывают по формуле

$$K_n = \bar{K} - \Delta,$$

где \bar{K} — среднее значение относительной плотности осадка, равное

$$\bar{K} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n K_i,$$

где K_i — коэффициент относительной плотности осадка в i -м испытании;

n — число испытаний;

Δ — доверительный интервал, равный

$$\Delta = St_{\alpha} / n^{0,5},$$

где S — дисперсия;

t_{α} — квантиль распределения Стьюдента при одностороннем доверительном интервале и доверительной вероятности 0,95.

Коэффициент относительной плотности осадка рассчитывают по формуле

$$K_i = \frac{m_c S_{p.c}}{S_c (m_d - m_c)},$$

где m_c , m_d — масса осадка (мг) в стакане и на поверхности диска пробоотборника, укрепленного на дне реакционного сосуда, после распыления навески массой 0,5 г;

S_c , $S_{p.c}$ — соответственно площади поперечного сечения стакана и реакционного сосуда, см².

Дисперсию рассчитывают по формуле

$$S = \left\{ \frac{1}{n-1} \left[\sum_{i=1}^n K_i^2 - \frac{\left(\sum_{i=1}^n K_i \right)^2}{n} \right] \right\}^{0,5}.$$

Значения квантиля t_{α} в зависимости от числа испытаний приведены ниже:

n	t_{α}	n	t_{α}
10	1,888	16	1,763
11	1,812	17	1,746
12	1,796	18	1,740
13	1,782	19	1,734
14	1,771	20	1,729
15	1,761		

При выполнении требований изложенного метода измеренная величина НКПР, например, бензойной кислоты, составляет $20 \pm 3 \text{ г} \cdot \text{м}^{-3}$.

1.11. Методы определения горючести

Коэффициент горючести K_r является безразмерным коэффициентом и служит для определения горючести вещества и расчета температуры вспышки вещества, исходя из температуры кипения. Коэффициент горючести можно рассчитывать по следующей формуле:

$$K_r = 4n_C + 4n_S + n_H + n_N - 2n_O - 2n_{Cl} - 3n_F - 5n_{Br},$$

где $n_C, n_S, n_H, n_N, n_O, n_{Cl}, n_F, n_{Br}$ — соответственно число атомов углерода, серы, водорода, азота, кислорода, хлора, фтора и брома в молекуле данного вещества.

Если коэффициент горючести K_r меньше единицы ($K_r < 1$), то вещество негорючее. Если коэффициент горючести больше единицы ($K_r > 1$), вещество является горючим.

Пример 1. Определить горючесть этиламина ($C_2H_5NH_2$).

Решение. Рассчитываем коэффициент горючести этиламина:

$$n_C = 2; \quad n_H = 7; \quad n_N = 1;$$

$$K_r = 4 \cdot 2 + 7 + 1 = 16; \quad K_r > 1.$$

Ответ. Этиламин — горючее вещество.

Пример 2. Определить горючесть закиси азота (N_2O).

Решение. Рассчитываем коэффициент закиси азота:

$$n_O = 1; \quad n_N = 2;$$

$$K_r = 2 - 2 \cdot 1 = 0; \quad K_r < 1.$$

Ответ. Закись азота — негорючее вещество.

Группу горючести жидкостей и плавящихся твердых веществ определяют с помощью прибора, схема которого показана на рис 1.21. В качестве нагревательного устройства используют тигельную электропечь 1, позволяющую создавать температуру до 900 °С.

При проведении испытаний электропечь нагревают до 900 ± 10 °С. Образец массой 10 г помещают в тигель 3 и опускают в печь. Продолжительность нагревания образца составляет примерно 3 мин. Если образец в течение этого времени не воспламеняется или начинает интенсивно кипеть без воспламенения, испытание прекращают, а результат считают отказом.

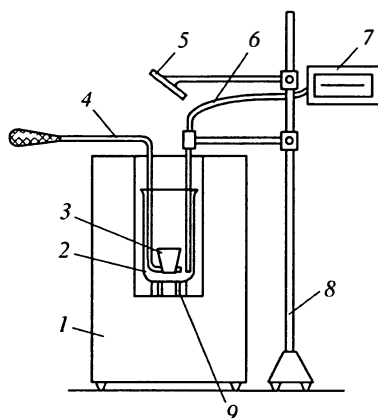


Рис 1.21. Прибор для оценки горючести жидкостей и плавящихся твердых веществ:

1 — тигельная электропечь; 2 — кварцевый стакан; 3 — фарфоровый тигель; 4 — держатель тигля; 5 — смотровое зеркало; 6 — термопара; 7 — потенциометр; 8 — штатив; 9 — керамическая подставка

Испытанию подвергают пять образцов исследуемого вещества. Если хотя бы в одном из пяти испытаний образец воспламеняется, ему дают возможность разгореться, затем тигель с горящим образцом вынимают из электропечи, включают секундомер и определяют продолжительность самостоятельного горения образца.

Если образец вне печи самостоятельно горит менее 5 с, то исследуемое вещество относят к группе трудногорючих. При времени самостоятельного горения 5 с и более проводят дополнительное испытание для определения температуры воспламенения и группы горючести. При наличии температуры воспламенения вещество относят к горючим, в отсутствие — к трудно горючим.

Горючесть твердых металлов определяют по трем независимым методам:

- группу горючих материалов выделяют по методу «огневой трубы»;
- группу трудногорючих — по методу керамической трубы (КТ);
- группу негорючих — по методу испытаний на горючесть.

Схема прибора «огневая труба» показана на рис. 1.22. Прибор состоит из камеры горения 1, представляющей собой стальную трубу с внутренним диаметром 50 мм и длиной 165 мм. Подготовленный к испытанию образец подвешивают на крючок держателя 5 в центре камеры. Под образец устанавливают зажженную горелку с высотой пла-

мени 40 мм. Материал относят к группе горючих при выполнении одного из следующих условий:

1) самостоятельное пламенное горение или тление хотя бы у одного из шести испытанных образцов продолжается более 60 с, и потеря массы превышает 20 %;

2) самостоятельное горение продолжается менее 60 с, но пламя распространяется по всей поверхности образца при одновременной потере массы не менее чем у двух образцов более 90 %;

3) самостоятельное пламенное горение композиционных материалов состоящих из горючих и негорючих компонентов, продолжается менее 60 с, но пламя распространяется по всей поверхности образца, и при этом выгорает вся органическая часть материала;

4) самостоятельное пламенное горение композиционных материалов продолжается более 60 с, потеря массы составляет менее 20 %. В этом случае потерю относят только к массе органической части материала.

После зажигания образца горелку убирают и фиксируют время самостоятельного горения. Максимальное время зажигания образца не превышает 2 мин. После завершения эксперимента определяют потерю массы образца.

Если указанные условия не выполняются, то испытания материала продолжают по методу керамической трубы (КТ). Схема прибора КТ показана на рис. 1.23. Прибор состоит из керамической огневой камеры 1 прямоугольной или цилиндрической формы высотой 300 мм.

Площадь поперечного сечения огневой камеры составляет $1,44 \cdot 10^2 \text{ см}^2$. Камера установлена на металлическую цилиндрическую подставку 8, снабженную поворотной заслонкой для регулирования подачи воздуха в зону горения и поддоном 9 для сбора твердых продуктов сгорания.

Для испытаний готовят четыре образца исследуемого материала длиной 150 мм, шириной 60 мм и фактической толщиной, не превышающей 10 мм. Образцы пенопластов должны быть толщиной 30 мм. Масса образца должна быть не менее 6 г. Сыпучие вещества и материалы испытывают в корзиночках.

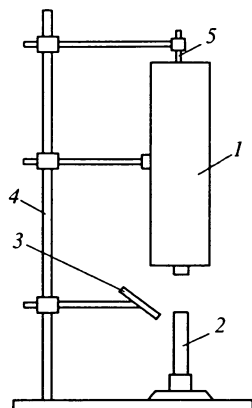


Рис 1.22. «Прибор огневая труба»:

1 — камера горения; 2 — газовая горелка; 3 — смотровое зеркало; 4 — штатив; 5 — держатель образца

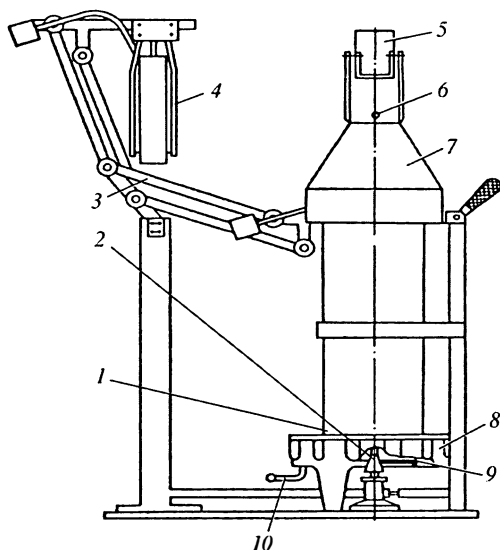


Рис. 1.23. Прибор КТ:

1 — огневая камера; 2 — газовая горелка; 3 — механизм ввода образца; 4 — держатель образца; 5 — смотровое зеркало; 6 — термопара; 7 — зонт; 8 — металлическая подставка; 9 — поддон; 10 — рукоятка поворотной заслонки

Внутреннюю поверхность камеры горения перед каждым испытанием покрывают двумя-тремя слоями алюминиевой фольги.

Исследуемый образец закрепляют в держателе 4, зажигают газовую горелку 2 и включают потенциометр. Ротаметром устанавливают такой расход газа в газовой горелке, при котором контролируемая в течение 2—3 мин температура газообразных продуктов горения в центре верхнего патрубка зонта составляет 200 ± 5 °С. Затем в камеру горения на 5 мин вводят исследуемый образец для определения времени зажигания τ_3 по характеру температурной кривой, записанной на диаграммной ленте потенциометра. За время зажигания принимают время достижения максимальной температуры.

После определения времени зажигания проводят три испытания с образцами исследуемого материала и одно тарировочное испытание с асбестоцементной плитой, воздействуя на каждый образец пламенем горелки в течение найденного времени зажигания. После истечения времени зажигания прекращают подачу газа в горелку и оставляют образец в огневой камере до остывания на 20 мин, считая с момента ввода образца внутрь камеры.

По полученным на диаграммной ленте температурным кривым газообразных продуктов горения определяют площади под этими кривыми S_i^T (для тарировочного испытания) и S_i (основного испытания). Начальным уровнем при определении S_i^T и S_i служит прямая, проведенная на диаграммной ленте через две точки, соответствующие температурам образца в начальный период испытания и в конечный период после истечения времени остывания τ_{20} .

Коэффициент горючести K_r для каждого испытанного образца рассчитывается по формуле:

$$K_r = \frac{S_i - S_i^T}{S_i^T} = \frac{S_i}{S_i^T} - 1.$$

За коэффициент горючести исследуемого материала принимают среднее арифметическое значение коэффициентов горючести трех испытанных образцов. Если $K_{r,cp}$ меньше или больше единицы, то для получения достоверных результатов проводят три дополнительных испытания при времени зажигания $(\tau_3 + 10)$ с и три испытания при времени зажигания $(\tau_3 - 10)$ с. За окончательный результат принимают максимальное значение $K_{r,cp}$, полученное при времени зажигания τ_3 , $(\tau_3 + 10)$ и $(\tau_3 - 10)$ с. При $K_{r,cp} \leq 1$ материал относят к трудно горючим, при $K_{r,cp} > 1$ — к горючим. Если $1 \leq K_{r,cp} \leq 2,5$, то материал считают горючим трудно воспламеняющимся.

Группу негорючих материалов определяют по СП 12.13130.2009. Схема установки для испытания веществ и материалов на негорючесть показана на рис. 1.24.

Испытания проводят при 825 ± 25 °С в трубчатой электропечи высотой 150 мм и диаметром 200 мм, имеющей внутренний сквозной канал диаметром 75 мм. Для нагрева внутреннего пространства печи до заданной температуры используют электроспираль. К нижнему концу канала печи прикреплен конический стабилизатор 2 высотой 500 мм.

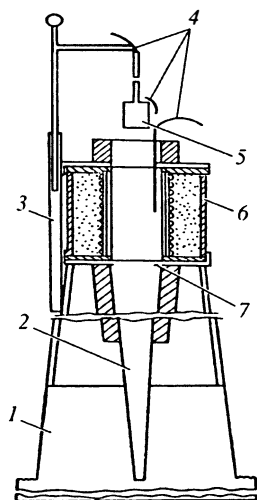


Рис 1.24. Установка для испытания веществ и материалов на негорючесть:

- 1 — опорная станина;
- 2 — стабилизатор;
- 3 — направляющая планка;
- 4 — термопары;
- 5 — держатель образца;
- 6 — печь;
- 7 — асбестовая прокладка

Диаметр верхнего отверстия стабилизатора равен 75 мм, нижнего 10 мм.

При проведении испытаний образец материала помещают в держатель 5 и опускают на 20 мин внутрь нагретой печи. Через каждые 10 с фиксируют показания трех термопар 4. Рабочий спай первой термопары расположен на расстоянии 10 мм от стенки печи в середине зоны постоянной температуры, рабочий спай второй термопары находится в центре образца, рабочий спай третьей — на поверхности образца (в середине его высоты). Образец взвешивают до и после проведения испытаний.

Проводят пять испытаний и определяют среднее из показаний.

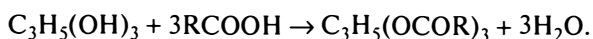
Материал относят к негорючим, если выполняются следующие условия: показания термопар в печи и на наружной поверхности образца не превышают более чем на 50 °С первоначально установленную температуру печи; средняя потеря массы образцов не превышает 50 % их начальной массы до введения в печь; среднее из всех показаний продолжительности пламенного горения не превышает 10 с.

1.12. Самовозгорание масел и жиров

По своему происхождению масла подразделяются на минеральные, растительные и животные. Минеральные масла представляют собой смесь глицеридов предельных карбоновых кислот, не имеющих двойных связей. Растительные и животные жиры — это смесь глицеридов предельных и непредельных кислот. Глицериды — сложные эфиры глицерина и карбоновой кислоты. В общем виде формулу глицеридов можно представить следующим образом:

$C_3H_5(OCOR)$, где $OCOR$ — остаток кислоты, CH_2CHCH_2 — остаток глицерина (обозначен C_3H_5).

Реакция образования глицеридов протекает по схеме:



Глицериды могут образоваться при взаимодействии:

1) глицерина с предельными кислотами с общей формулой $C_nH_{2n+1}COOH$:

$C_{15}H_{31}COOH$ — пальмитиновая кислота — глицерид пальмитиновой кислоты $C_3H_5(OCO C_{15}H_{31})_3$;

$C_{17}H_{35}COOH$ — стеариновая кислота — глицерид стеариновой кислоты $C_3H_5(OCO C_{17}H_{35})_3$.

2) глицерина с непредельными кислотами, содержащими двойные связи ($C_nH_{2n-1}COOH$ — общая формула непредельных карбоновых кислот):

$C_{17}H_{33}COOH$ — олеиновая кислота (содержит одной двойную связь);

$C_{17}H_{31}COOH$ — линолевая кислота (содержит две двойные связи);

$C_{17}H_{29}COOH$ — линоленовая кислота (содержит три двойные связи).

Глицериды кислот, соответственно:

$C_3H_5(OCO C_{17}H_{33})_3$;

$C_3H_5(OCO C_{17}H_{31})_3$;

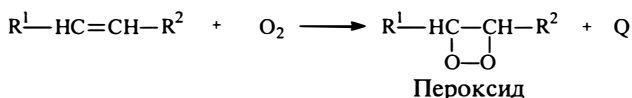
$C_3H_5(OCO C_{17}H_{29})_3$.

Масла с высоким содержанием глицеридов предельных кислот незначительно подвержены самонагреванию и самовозгоранию, с малым содержанием глицеридов предельных кислот не склонны к нему. Масла с высоким содержанием глицеридов непредельных карбоновых кислот имеют склонность к самонагреванию и самовозгоранию.

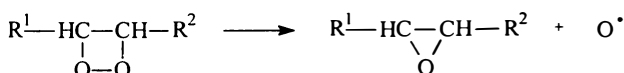
1.12.1. Механизм самоокисления масел и жиров

Процесс самонагревания и самовозгорания масел, содержащих большое количество глицеридов непредельных кислот, протекает за счет процессов их самоокисления под действием кислорода воздуха.

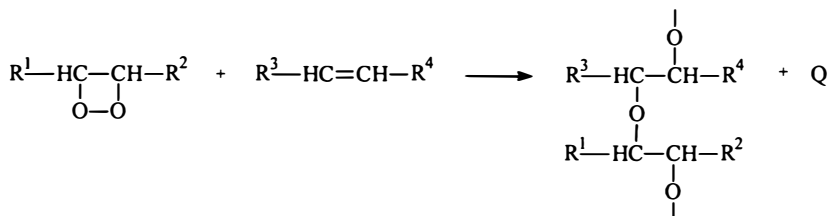
У многих органических веществ способность самоокисляться связана с наличием в их структуре двойных связей. Электроны этой связи подвижны и легко поляризуемы. При взаимодействии с кислородом воздуха они легко раскрываются, присоединяя кислород и образуя пероксиды (первичные продукты окисления) по схеме:



Пероксиды разлагаются с выделением атомарного кислорода (O^*), который вызывает реакцию окисления органических соединений и процесс приобретает цепной характер.



Органические пероксиды также инициируют реакции полимеризации:



Радикал O^\bullet взаимодействует даже с трудно окисляющимися компонентами масел (глицеридами предельных кислот). Процесс носит экзотермический характер.

Чем больше двойных связей содержится в глицериде, тем больше O_2 присоединяется к его молекуле и больше тепла выделяется при окислении (так как процесс экзотермический) и тем больше способность глицеридов (соответственно и масел) к самовозгоранию.

1.12.2. Определение йодного числа

О способности масла к самовозгоранию можно судить по величине йодного числа (m_j).

Йодное число m_j — масса йода (г), которую присоединят 100 г масла.

Чем выше m_j , тем более склонно масло к самовозгоранию. Ниже приведены m_j некоторых растительных масел и животных жиров:

Жиры		Масла	
Бараний	31—46	Касторовое	82—86
Свиной	42—66	Хлопковое	100—120
Тюлений	122—162	Подсолнечное	127—136
Моржовый	168	Конопляное	145—167
Олеиновая кислота техническая	80—115	Льняное	175—192
		Соевое	114—139

Самое большое йодное число имеет льняное масло. Волокнистые материалы, пропитанные льняным маслом, при всех прочих равных условиях самовозгораются быстрее, чем материалы, пропитанные

другими маслами. Олифа, приготовленная из льняного масла, способна самовозгораться, хотя ее йодное число меньше, чем льняного масла. Объясняется это тем, что в олифу добавляют сиккатив, ускоряющий ее высыхание, т. е. окисление и полимеризацию. Полунаатуральные олифы, представляющие собой смеси окисленного льняного масел с растворителями, имеют небольшие йодные числа и мало способны к самовозгоранию. Искусственные олифы совершенно не способны самовозгораться.

Жиры рыб и морских животных имеют высокое йодное число, но обладают незначительной способностью к самовозгоранию, что обусловлено присутствием в них продуктов, замедляющих окисление.

Масла, жиры или олифы, хранящиеся в бочке, бутылки или резервуаре, самовозгораться не могут, так как поверхность соприкосновения их с воздухом (поверхность окисления) очень мала. Для того, чтобы создать условия самовозгорания, необходимо увеличить поверхность окисления, например, смочить маслом, жиром или олифой волокнистые или мелко раздробленные и пористые вещества (вату, обтирочные концы, тряпки, паклю, стружки, опилки и т. п.).

Для самовозгорания необходимо также, чтобы поверхность окисления была значительно больше поверхности теплоотдачи. Такие условия создаются в том случае, когда промасленные материалы сложены в кучи, штабеля, пакеты и прилегают близко один к другому. При этом, если в вате или ткани содержится большое количество масла, оно не способно к самовозгоранию, так как масло закрывает поры ткани и склеивает волокна, в результате чего поверхность окисления уменьшается. Соотношение материалов при самовозгорании определяется как свойствами пропитанного материала, так и свойствами масел и жиров. Например, самовозгорание хлопковой ваты, смоченной олифой, наиболее вероятно при соотношении 2 : 1, т. е. две части олифы (по массе) на одну часть ваты. Для других веществ это соотношение может быть иным, его можно определить экспериментально на приборе Маккея.

Способность масел и жиров к самовозгоранию тем выше, чем больше уплотнен промасленный материал. Но если материал слишком уплотнен, способность промасленного материала к самовозгоранию уменьшается, так как при сжатии поверхность окисления уменьшается и подвод кислорода к маслу сокращается.

Способность промасленных материалов к самовозгоранию увеличивается в случае присутствия в них катализаторов, ускоряющих окисление и полимеризацию масел, а также при повышении темпера-

туры воздуха. Катализаторами для самовозгорания масел являются соли различных металлов — марганца, свинца, кобальта, так называемых сиккативов. Наиболее низкая температура, при которой на практике наблюдали самовозгорание масел и жиров, составляла 10—15 °С.

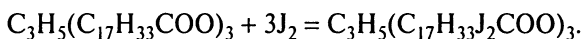
Индукционный период самовозгорания промасленных материалов может составлять от нескольких часов до нескольких дней. Это зависит от объема промасленного материала, вида масла или жира, их количества, температуры воздуха и других факторов.

Познакомимся с расчетом йодного числа.

Пример 1. Рассчитайте йодное число глицерида олеиновой кислоты.

Решение

1. Записываем химическую реакцию взаимодействия глицерида олеиновой кислоты (триолеат*) с йодом:



2. Рассчитываем молекулярную массу глицерида — она равна $M = 884$ г/моль.

3. Составляем пропорцию по реакции:

с 884 г глицерида взаимодействует $127 \cdot 2 \cdot 3$ г I_2 ;

со 100 г масла взаимодействует X г I_2 ;

$$X = m_I = 86,2 \text{ г.}$$

4. Определяем склонность к самовозгоранию.

Масла, у которых:

$m_I > 100$ — склонны к самовозгоранию;

$m_I < 100$ — мало склонны к самовозгоранию;

$m_I < 50$ — не склонны к самовозгоранию.

Сделаем вывод о склонности к самовозгоранию.

Пример 2. Рассчитайте йодное число подсолнечного масла, имеющего состав:

тристеарата — 9 %;

триолеата (глицерид олеиновой кислоты*) — 38 %;

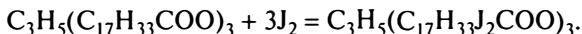
трилинолеата — 53 %.

* Разные названия одного вещества.

Решение

Расчет будем производить по содержанию триолеата и трилинолеата. Содержание тристеарата при расчете не учитываем, так как он не содержит двойных связей и не присоединяет йод.

1. Составляем уравнение химической реакции взаимодействия триолеата с йодом:

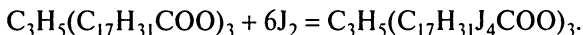


2. Рассчитываем молекулярную массу триолеата по брутто-формуле $M = 884$ г/моль.

3. Составляем пропорцию и определяем m_j :

$$\begin{array}{r} 884 \text{ —————} 254 \cdot 3; \\ 38 \text{ —————} x; \end{array} \quad x = \frac{254 \cdot 3 \cdot 38}{884} = 32,75 \text{ г.}$$

4. Записываем химическую реакцию взаимодействия трилинолеата с йодом:



5. Рассчитываем молекулярную массу трилинолеата:

$$M = 878 \text{ г/моль.}$$

6. Составляем пропорцию и определяем m_j :

$$\begin{array}{r} 878 \text{ —————} 254 \cdot 6; \\ 53 \text{ —————} x; \end{array} \quad x = \frac{254 \cdot 6 \cdot 53}{878} = 92 \text{ г.}$$

7. Определяем суммарное йодное число:

$$m_j = 32,75 + 92 = 124,75 \approx 125 \text{ г.}$$

Ответ: суммарное йодное число составляет 125,2 г. Подсолнечное масло данного состава склонно к самовоспламенению.

1.13. Горение твердых веществ и материалов

Твердые вещества и материалы чаще всего подвергаются возгоранию и представляют наибольшую пожароопасность. Рассмотрим некоторые методики расчета температуры воспламенения, скорости горения, тепловой нагрузки твердых материалов.

1.13.1. Температурные интервалы воспламенения и горения твердых веществ и материалов

При попадании твердого образца в зону действия источника зажигания происходит интенсивный нагрев поверхностного слоя материала и его подсушивание (удаление адсорбционной влаги). Этот процесс протекает в интервале температур 120—130 °С. При температуре 150 °С начинается разложение древесины и выделение летучих веществ, в составе которых преобладают негорючие газы (CO_2 , H_2O), и их значительный выход наблюдается при температуре 180—200 °С.

Процесс термического разложения (пиролиз) органической части древесины протекает через разрыв межмолекулярных и внутримолекулярных связей с образованием нестойких активных промежуточных комплексов, которые в результате быстрого реагирования между собой или O_2 воздуха образуют более устойчивые продукты пиролиза — смолы, кислоты, спирты, газы (метан CH_4 , угарный газ CO , этан C_2H_6 , водород H_2 и др.)

При температуре 300 °С выход летучих веществ обеспечивает образование газозащитной смеси, которая может воспламеняться под воздействием источника зажигания. Часть тепла, выделяющегося в зоне горения, поступает к поверхности древесины и способствует более интенсивному ее разложению, в результате чего происходит непрерывное пополнение зоны горения горючими парами и газами. Время воспламенения будет зависеть от влажности материала и его плотности

$$\tau_{\text{всп}} = \frac{A}{q^n},$$

где $\tau_{\text{всп}}$ — время воспламенения, с;

q — интенсивность теплового потока кВт/м^2 ;

A, n — эмпирические константы (зависят от природы материала).

Как показали исследования, скорость распространения пламени по поверхности твердого горючего материала определяется, в основном конвективными тепловыми потоками от факела пламени. Скорость распространения пламени зависит от следующих факторов:

1) вида материала — его физико-химических свойств: теплопроводности, теплоемкости, количества летучих веществ, критической температуры пиролиза и его теплового эффекта (так, например, при разложении 1 кг древесины выделяется 800 г летучих веществ и образуется 200 г древесного угля);

2) влажности материала;

3) пространственной ориентации образца (скорость выгорания максимальна, когда направление движения пламени совпадает с направлением движения конвективных потоков);

4) начальной температуры горючего материала.

При сгорании твердых материалов выделяется значительное количество теплоты. Так, например, 1 кг древесины (березы) при горении выделяет 18343,3 кДж.

Разложение целлюлозных материалов также сопровождается выделением теплоты. При малой скорости теплоотвода возможно самонагревание и горение этих материалов ($Q_{\text{разл}} = 1088$ кДж/кг). Поэтому нельзя допускать их самонагревание выше 100°C в больших массах и при плотной укладке.

Основным количественным параметром, характеризующим выгорание твердых материалов, является массовая скорость выгорания, которая определяет динамику пожара, тепловой режим пожара (величину и скорость изменения температуры пожара). Это позволяет рассчитать допустимое время эвакуации, фактическую огнестойкость конструкций, а также определить скорость распространения пламени, изменение площади пожара.

Различают массовую и линейную скорость выгорания. Однако для твердых материалов в практике пожарно-технических расчетов чаще используют приведенную массовую скорость выгорания

$$W_{\text{п.п}} = \frac{h}{\Delta t},$$

где h — глубина выгорания образца, м;

Δt — время выгорания, с.

Приведенная массовая скорость выгорания — количество вещества, выгорающего в единицу времени с единицы площади пожара.

Связь между действительной и приведенной скоростями выгорания выражается соотношением

$$W_{\text{п.п}} = W \cdot K_{\text{п}},$$

где $W_{\text{п.п}}$ — приведенная массовая скорость выгорания, $\text{кг}/\text{м}^2 \cdot \text{с}$;

W — удельная массовая скорость выгорания (с единицы поверхности горения), $\text{кг}/\text{м}^2 \cdot \text{с}$;

$K_{\text{п}}$ — коэффициент поверхности горения.

$$K_{\text{п}} = \frac{S_{\text{п.г}}}{S_{\text{пож}}}, \quad (1.47)$$

где $S_{п.г}$ — поверхность горения, m^2 ;
 $S_{пож}$ — площадь пожара, m^2 .

Например, при горении образца твердого материала в виде куба, лежащего на одной из граней, $K_n = 5$. Массовая скорость выгорания не является константой горючего, ее величина зависит от условий горения. По физической сущности скорость выгорания эквивалентна скорости пиролиза материала, приведенной к единице поверхности, под влиянием теплового потока от пламени той или иной интенсивности. Она также зависит от природы материала, влажности образца, его толщины, пространственной ориентации. Экспериментально ее определяют на установке «Камера-весы» (камера — модель помещения, пол которого соединен с платформой весов). Фиксируется потеря массы испытуемого материала во времени. Производная кривой потери массы горючего, отнесенная к площади пола камеры, во времени представляет собой приведенную массовую скорость выгорания. Массовая скорость выгорания некоторых материалов приведена в табл. 1.15.

Таблица 1.15. Массовые скорости выгорания некоторых материалов

Материал	Массовая скорость выгорания, $W \cdot 10^{-3}$, $кг/м^2 \cdot с$	
	действительная	приведенная
Бумага разрыхленная	—	8,0
Древесина	7—8	15,0
Каучук натуральный	—	13,3
Каучук синтетический	—	8,8
Натрий металлический	12—15	—
Органическое стекло	—	16,0
Полистирол	—	14,3
Резина	—	11,2
Текстолитовые изделия	—	6,7
Торф (влажность 40 %)	—	3,0
Хлопок разрыхленный	—	4,0
Штапельное волокно (разрыхленное)	—	6,7
Фенопласты	—	5,8

В условиях внутреннего пожара массовая скорость выгорания существенно зависит от условий газообмена. При ее расчете вводят эмпирические поправочные коэффициенты.

1.14.2. Расчет величины пожарной нагрузки, коэффициента поверхности горения, скорости выгорания

Пожарная нагрузка (массовая) — масса горючих материалов, приведенная к единице площади помещения, кг/м²:

$$P_{п.н} = \frac{\sum_{i=1}^n M_i}{S}, \quad (1.48)$$

где M_i — масса i -го горючего материала;

S — площадь помещения, м².

Пожарная нагрузка (тепловая) — количество теплоты, выделяемое горючим материалом при его полном сгорании (до CO₂, H₂O, SO₂) с единицы площади пола помещения, МДж/м²:

$$q_{п.н} = \frac{\sum_{i=1}^n Q_{п_i}}{S}, \quad (1.49)$$

где $Q_{п_i}$ — количество теплоты, выделяемое i -м горючим материалом, Дж.

Так как $Q_{п_i} = M_i Q_{н_i}$, где $Q_{н_i}$ — низшая теплота горения (кДж/кг), из формул (1.48) и (1.49) следует:

$$q_{п.н} = \frac{\sum_{i=1}^n M_i Q_{н_i}}{S} = \sum_{i=1}^n P_{п.н} Q_{н_i}. \quad (1.50)$$

Поверхность горения — поверхность горючих материалов, с которой может происходить выделение продуктов разложения (испарения) при горении материалов ($S_{п.г}$, м²).

Площадь пожара — проекция зоны горения на горизонтальную (реже вертикальную) плоскость ($S_{п}$, м²).

Коэффициент поверхности горения элемента пожарной нагрузки (стол, стул, диван и пр.) — отношение поверхности горения к ее проекции на горизонтальную поверхность (площадь пожара), м²/м²:

$$K_{п_i} = \frac{S_{п.г_i}}{S_{п_i}}, \quad (1.51)$$

где $S_{n.r_i}$ — площадь поверхности горения i -го изделия, m^2 ;
 S_{n_i} — площадь пожара элемента пожарной нагрузки, m^2 .

Коэффициент поверхности горения пожарной нагрузки — отношение суммарной поверхности горения пожарной нагрузки к площади пола помещения, m^2/m^2 :

$$K_n = \frac{\sum_{i=1}^n S_{n.r_i}}{S}, \quad (1.52)$$

где S — площадь пола помещения, m^2 .

Из формул (1.51) и (1.52) следует

$$K_n = \frac{\sum_{i=1}^n S_{n_i} K_{n_i}}{S}. \quad (1.53)$$

Массовая скорость выгорания пожарной нагрузки — масса горючего, выгорающего в единицу времени, $кг/с$:

$$v_m = \frac{\Delta M}{\Delta \tau}. \quad (1.54)$$

Приведенная массовая скорость выгорания — масса горючего, выгорающая в единицу времени с единицы площади пожара, $кг/(m^2 \cdot с)$:

$$v_m^{np} = \frac{\Delta M}{\Delta \tau S_n}. \quad (1.55)$$

Удельная скорость выгорания (истинная) — масса горючего, выгорающая в единицу времени с единицы поверхности, $кг/(m^2 \cdot с)$:

$$v_m^{уд} = \frac{\Delta M}{\Delta \tau S_{n.r}}. \quad (1.56)$$

Из формул (1.55) и (1.56) следуют выражения:

$$v_m^{n.p} = \frac{v_m}{S_n}; \quad (1.57)$$

$$v_m^{уд} = \frac{v_m}{S_{n.r}}. \quad (1.58)$$

Из формул (1.55)—(1.57) следует выражение

$$v_m^{п.р} = v_m^{уд} K_n. \quad (1.59)$$

Линейная скорость распространения пламени по поверхности пожарной нагрузки — расстояние ΔL , пройденное фронтом пламени в единицу времени:

$$v_{л} = \frac{\Delta L}{\Delta \tau}. \quad (1.60)$$

Скорость распространения пламени зависит от типа помещения, степени огнестойкости, пожарной нагрузки (табл. 28, прил III) и времени развития пожара. В пожарно-технических расчетах принято, что в первые 10 мин развития пожара скорость составляет половину стационарного значения, а после 10 мин равна стационарному (табличному) значению. Следовательно, расчет расстояния, пройденного фронтом пламени:

$$\text{при } \tau \leq 10 \text{ мин} \quad L = 0,5 v_{л} \tau; \quad (1.61)$$

$$\text{при } \tau > 10 \text{ мин} \quad L = 0,5 v_{л} (\tau - 5). \quad (1.62)$$

Пример 1. Рассчитать величину пожарной нагрузки (кг/м^2 , МДж/м^2) столярной мастерской размером 9×12 м. Пожарная нагрузка состоит из деревянного дощатого пола (толщина досок 0,04 м), покрытого линолеумом (толщина 0,002 м), двух столярных верстаков массой 54 кг каждый и шкафа для инструмента массой 85 кг.

Решение. Согласно формуле (1.48) для определения величины пожарной нагрузки рассчитываем суммарную массу горючего материала и площади помещения. Масса горючего материала состоит из пола ($M_{\text{пол}}$), линолеума ($M_{\text{лин}}$), верстаков ($M_{\text{вер}}$) и шкафа ($M_{\text{шк}}$):

$$\sum M_i = M_{\text{пол}} + M_{\text{лин}} + M_{\text{вер}} + M_{\text{шк}};$$

$$M_{\text{пол}} = V_{\text{пол}} \rho_{\text{др}} = S_{\text{пол}} \rho_{\text{др}} \sigma_{\text{др}};$$

$$M_{\text{лин}} = V_{\text{лин}} \rho_{\text{лин}} = S_{\text{лин}} \rho_{\text{лин}} \sigma_{\text{лин}},$$

где V — объем досок пола, линолеума, м^3 ;

$\sigma_{\text{др}}$ и $\sigma_{\text{лин}}$ — соответственно толщина досок и линолеума, м;

$\rho_{\text{др}}$ и $\rho_{\text{лин}}$ — соответственно плотность древесины и линолеума, кг/м^3 .

Принимаем $\rho_{\text{др}} = 450 \text{ кг/м}^3$, а $\rho_{\text{лин}} = 1250 \text{ кг/м}^3$, тогда:

$$M_{\text{пол}} = 9 \cdot 12 \cdot 4 \cdot 10^{-2} \cdot 450 = 1944 \text{ кг};$$

$$M_{\text{лин}} = 9 \cdot 12 \cdot 2 \cdot 10^{-3} \cdot 1250 = 270 \text{ кг};$$

$$\sum M_i = 1944 + 270 + 2 \cdot 54 + 85 = 2407 \text{ кг}.$$

Площадь помещения

$$S = 9 \cdot 12 = 108 \text{ м}^2.$$

Пожарная нагрузка согласно уравнению (1.48) составляет

$$P_{\text{п.н}} = \frac{2407}{108} = 22,2 \text{ кг/м}^2.$$

Для расчета величины тепловой нагрузки в МДж/м^2 по формулам (1.49) и (1.50) необходимо определить низшую теплоту сгорания горючего материала. Ее можно рассчитать по формулам (1.23)—(1.24).

Примем для дощатого пола влажность 20 %. $Q_{\text{н}} = 14\,400 \text{ кДж/кг}$, для материала верстака и шкафа (древесина влажностью 10 %) $Q_{\text{н}} = 16\,500 \text{ кДж/кг}$, для линолеума — $33\,520 \text{ кДж/кг}$ (данные приняты по табл. 8, прил. III).

Вычисляем количество тепла, выделяемого при сгорании материалов:

$$Q = \sum M_i Q_{\text{ни}},$$

где M_i — масса i -го элемента горючего материала;

$Q_{\text{ни}}$ — низшая теплота i -го элемента горючего материала.

$$\begin{aligned} Q &= 1944 \cdot 14\,400 + 33\,520 \cdot 270 + 16\,500(2 \cdot 54 + 85) = \\ &= 40\,228\,500 \text{ кДж} = 40\,228,5 \text{ МДж}. \end{aligned}$$

Пожарную нагрузку определяем по формуле (1.50):

$$q_{\text{п.н}} = \frac{40\,228,5}{108} = 372,486 \text{ МДж/м}^2.$$

Пример 2. Рассчитать коэффициент поверхности горения штабеля, состоящего из N брусков размерами $a \cdot a \cdot b$ (a — стороны торца, b — длина бруска), равномерно уложенных в n рядов.

Решение

Согласно формуле (1.51) определяем площадь пожара и поверхность горения.

Поверхность горения ($S_{п.г}$) рассчитываем как разницу между общей (S_o) и скрытой (S_c) поверхностями брусьев:

$$S_{п.г} = S_o - S_c.$$

Общая поверхность брусьев

$$S_o = (2a^2 + 4ab)N.$$

Скрытая поверхность состоит из поверхности брусьев первого ряда, уложенных на грунт (S_n) и перекрытых поверхностей (S_p) в $(n - 1)$ ряду, причем верхний ряд брусьев открыт. Количество брусьев в одном ряду — N/n ; количество перекрытий в одном ряду — $(N/n)^2$.

Скрытая поверхность брусьев первого ряда

$$S_n = ab(N/n).$$

Определяем скрытую поверхность брусьев за счет их перекрытия:

$$S_p = 2a^2 \frac{N}{n} (n - 1).$$

Поверхность горения штабеля составляет

$$S_{п.г} = S_o - S_n - S_p = (2a^2 + 4ab)N - ab\left(\frac{N}{n}\right) - 2a^2\left(\frac{N}{n}\right)^2 (n - 1);$$

$$K_n = \frac{(2a^2 + 4ab)N - ab\left(\frac{N}{n}\right) - 2a^2\left(\frac{N}{n}\right)^2 (n - 1)}{b^2}.$$

Подставляем в формулы необходимые значения и производим вычисления.

Пример 3. Рассчитать массовую, приведенную и удельную скорости выгорания штабеля, состоящего из 50 брусков размером $30 \times 30 \times 250$ см, равномерно уложенных в 10 рядов, если за 35 мин пожара потеря массы составила 15 % исходной.

Решение

1. Определяем потерю массы штабеля (ΔM), площадь пожара (S_n), поверхность горения (S). Для расчетов используем формулы (1.54)—(1.56).

2. Исходную массу штабеля (M_o) определяем по формуле

$$M_o = a^2 b N \rho_{др},$$

где $\rho_{др}$ — плотность древесины, 450 кг/м³.

$$M_0 = 0,3^2 \cdot 2,5 \cdot 50 \cdot 450 = 5063 \text{ кг};$$

$$\Delta M = 0,15 \cdot 5063 = 759,4 \text{ кг}.$$

3. Массовую скорость выгорания вычисляем по формуле (1.54):

$$v_m = \frac{759,4}{35 \cdot 60} = 0,362 \text{ кг/с}.$$

4. Вычисляем приведенную массовую скорость выгорания по формуле

$$v_m^{п.р} = \frac{759,4}{35 \cdot 60 \cdot 2,5^2} = 0,0579 \text{ кг/м}^2 \cdot \text{с}. \quad (1.63)$$

5. Определяем коэффициент поверхности горения:

$$K_n = \frac{(2a^2 + 4ab)N - ab\left(\frac{N}{n}\right) - 2a^2\left(\frac{N}{n}\right)^2(n-1)}{b^2};$$

$$K_n = \frac{(2 \cdot 0,3^2 + 4 \cdot 0,3 \cdot 2,5)50 - 0,3 \cdot 2,5\left(\frac{50}{10}\right) - 2 \cdot 0,3^2\left(\frac{50}{10}\right)^2(10-1)}{2,5^2} = 18,4.$$

2. Вычисляем удельную скорость по формуле (1.59):

$$v_m^{уд} = \frac{0,0579}{18,4} = 3,15 \cdot 10^{-3} \text{ кг/(м}^2 \cdot \text{с)}.$$

Пример 4. Рассчитать коэффициент поверхности горения пожарной нагрузки столярной мастерской размером 10 × 15 м, с дощатым полом, покрытым линолеумом, в которой находятся три верстака, стеллаж для инструментов, три жестких стула и шкаф.

Решение. Из табл. 29, прил. III, принимаем размеры изделий и коэффициент поверхности горения, данные сводим в табл. 1.16.

Рассчитываем поверхность горения изделий и результаты сводим в табл. 1.16:

$$S_{п.гi} = K_{пi} S_{пi} N_i,$$

где $S_{п.гi}$ — площадь проекции i -го изделия на поверхность пола;

N — количество i -го предмета.

Таблица 1.16

Изделие	Количество	K_n изделия	Размер изделия, м	Поверхность горения $S_{п.г.}$, м ²
Пол	1	1	10 × 15	150
Верстак	3	4	1,5 × 0,8 × 1,0	14,4
Стеллаж	1	16,6	1,86 × 0,45 × 2,0	13,9
Стул	3	4,5	0,4 × 0,4 × 0,82	2,2
Шкаф	1	8,1	1,2 × 0,45 × 1,25	4,4

По формуле (1.52) вычисляем коэффициент поверхности горения:

$$K_n = \frac{150 + 14,4 + 13,9 + 2,2 + 4,4}{150} = 1,23.$$

Пример 5. Рассчитать расстояние, на которое переместится фронт пламени на 8-й и 16-й минутах развития пожара, если табличное значение линейной скорости распространения пламени составляет 1 м/мин.

Решение. Согласно формуле (1.61) расстояние составляет:

$$\text{на 8 мин } L = 0,5 \cdot 1 \cdot 0,8 = 0,4 \text{ м};$$

$$\text{на 16 мин } L = 1 \cdot (16 - 5) = 11 \text{ м}.$$

Пример 6. Определить линейную скорость распространения пожара, если через 25 мин после его возникновения фронт пламени переместится на 16 м.

Решение. Так как время горения составляет более 10 мин, согласно выражению (1.62) линейная скорость будет равна

$$v_{л} = \frac{L}{\tau - 5} = \frac{16}{25 - 5} = 0,8 \text{ м/мин}.$$

Ответ. Линейная скорость равна 0,8 м/мин.

Практические работы

Общие методические указания по выполнению практических работ

Приведенные в пособии практические работы рассчитаны на двухчасовые занятия в аудитории среди подготовленных студентов. Работы могут выполняться одновременно несколькими звеньями студентов по отдельным заданиям. При необходимости преподаватель может изменить объем и содержание работ или предложить выполнить работы по отдельным заданиям либо их части.

Для выполнения расчетов студентам выдаются задания и исходные данные, а также необходимые методические указания, дополнительные справочные и нормативные материалы.

Содержание и ход выполнения работ оформляются студентами в виде отчета по нижеприведенной форме.

Отчет по практической работе (указываются тема работы и номер задания)

1. *Цель и задачи работы.*
2. *Краткое описание сущности методики исследований, принципов расчетов.*

3. *Расчеты.*

4. *Графики.*

5. *Выводы по работе.*

Работу выполнил

студент группы

Проверил

ФИО

ФИО

При оформлении расчетной части отчета необходимо указать определяемую величину, привести общую расчетную формулу с последующей расшифровкой всех составляющих формулы и указанием их

количественных значений, размерности; подставить значения составляющих в формулу и произвести расчет. Недостающие для выполнения расчета исходные данные, а также размерность величин принимаются по таблицам из прил. I—III.

Выводы по работе должны содержать основные расчетные значения определяемых величин.

Полностью оформленный отчет предоставляется преподавателю на проверку и защиту выполненной работы. Защита отчета производится в установленном преподавателем порядке.

Практическая работа 1

РАСЧЕТ РАСХОДА ВОЗДУХА НА ГОРЕНИЕ

Цель работы: научиться рассчитывать теоретически необходимый расход воздуха на горение.

Общие положения

Метод расчета теоретически необходимого количества воздуха зависит от состава горючего вещества. Горючее вещество может быть индивидуальным, т. е. состоять из одного химического соединения, а может представлять сложную смесь химических соединений.

Все горючие вещества для удобства расчетов подразделены на три типа:

- индивидуальное химическое соединение (метан, этан, ацетилен, этанол, уксусная кислота и т. д.);
- смесь веществ сложного состава (нефть, мазут, торф, уголь, древесина и т. д.);
- смесь газов (природный газ, генераторный газ и т. д.).

Рассмотрим методы расчета теоретически необходимого расхода воздуха на горение для разных типов горючих веществ.

Для практических расчетов принимаем, что воздух состоит из 21 % кислорода и 79 % азота. Таким образом, объемное соотношение азота и кислорода в воздухе составит:

$$\frac{\varphi_{N_2}}{\varphi_{O_2}} = \frac{79}{21} = 3,76,$$

где φ_{N_2} , φ_{O_2} — соответственно объемное (% , об.) содержание азота и кислорода в окислительной среде. Следовательно, на 1 м^3 (кмоль) кислорода в воздухе приходится $3,76 \text{ м}^3$ (кмоль) азота.

Горючее вещество — индивидуальное химическое соединение

Для таких горючих веществ независимо от их агрегатного состояния теоретически необходимое количество воздуха определяется из уравнений реакции горения. На m · кмоль горючего вещества приходится n · кмоль кислорода и $3,76 n$ · кмоль азота. Обозначив массу (в кг) горючего вещества, численно равную его молекулярному весу, через M , составляем пропорцию:

$$\begin{aligned} m M \text{ кг} & \text{---} (n + 3,76n) \cdot 22,4, \\ 1 \text{ кг} & \text{---} V_B^{\circ}, \end{aligned}$$

где 22,4 — объем 1 Кмоля газов, м^3 (при $0 \text{ }^{\circ}\text{C}$ и давлении 760 мм рт. ст.).

Теоретически необходимое количество воздуха для сгорания 1 кг вещества равно (из пропорции):

$$V_B^{\circ} = \frac{(n + 3,76n) \cdot 22,4}{mM} = \frac{106,6n}{mM}. \quad (1.64)$$

Подобным образом выводится уравнение для определения теоретически необходимого количества воздуха для сгорания 1 м^3 горючих газов:

$$V_B^{\circ} = \frac{4,76}{m}. \quad (1.65)$$

Если объемы воздуха, полученные по формулам (1.64) и (1.65) необходимо привести к иным условиям температуры и давления, то пользуются формулой:

$$V_B = \frac{V_B^{\circ} \cdot T \cdot 760}{273 \cdot p} = 2,784 \cdot \frac{V_B^{\circ} T}{p}, \quad (1.66)$$

где T — заданная температура газов, К;

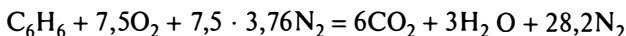
p — заданное давление, мм рт. ст.

Некоторые физические константы индивидуальных соединений приведены в табл. 18, прил. III.

Пример 1. Определить объем воздуха, необходимый для сгорания 1 кг бензола при $20 \text{ }^{\circ}\text{C}$ и давлении 750 мм рт. ст.

Решение

Составляем уравнение реакции горения бензола в воздухе:



По уравнению (1.64) определяем теоретически необходимый объем воздуха при нормальных условиях:

$$V_B^o = \frac{106,6 \cdot 7,5}{78} = 10,25 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

При заданных условиях этот объем будет равен (уравнение 1.66):

$$V_B = \frac{10,25 \cdot 293 \cdot 760}{273 \cdot 750} = 11,14 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Ответ. Для сгорания 1 кг бензола необходимо 11,14 м³/кг воздуха.

Для расчета расхода воздуха (массы и объема), необходимого для горения газообразного индивидуального химического соединения при нормальных условиях, используют формулу:

$$V_B^o = \frac{n_{O_2} + n_{N_2}}{n_r}, \quad (1.67)$$

где n_{O_2} , n_{N_2} , n_r — количество кислорода, азота, горючего, соответственно, получаемого из уравнения химической реакции горения, моль.

Масса воздуха, пошедшего на горение, определяется по уравнению:

$$M_B = V_B \rho_B, \quad (1.68)$$

где ρ_B — плотность воздуха, кг/м³ (табл. 16, прил. III).

Очевидно, что

$$\rho_B = \frac{\varphi_{N_2} \mu_{N_2} + \varphi_{O_2} \mu_{O_2}}{V_0} \cdot \frac{p T_0}{p_0 T}, \quad (1.69)$$

где φ_{N_2} , φ_{O_2} — концентрация азота, кислорода в окислительной среде (% , об.);

μ_{N_2} , μ_{O_2} — мольная доля азота и кислорода в горючей смеси;

p_0 — давление при нормальных условиях, Па;

p — атмосферное давление, Па;

T — температура воздуха, К;

T_0 — температура воздуха при нормальных условиях, К;

V_0 — объем воздуха при нормальных условиях.

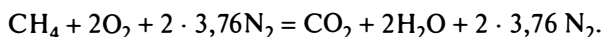
После подстановки постоянных значений в формулу (1.69), получим:

$$\rho_v = 3,47 \cdot 10^{-3} \frac{P}{T}. \quad (1.70)$$

Пример 2. Определить теоретические массу и объем воздуха, необходимого для горения 1 м³ метана при нормальных условиях.

Решение

Горючее вещество является индивидуальным химическим соединением, поэтому для расчета его объема надо пользоваться формулой (1.67). Запишем уравнение химической реакции горения CH_4 в воздухе:



Из уравнения реакции находим стехиометрические коэффициенты:

$$n_{\text{O}_2} = 2;$$

$$n_{\text{N}_2} = 2 \cdot 3,76 = 7,52;$$

$$n_{\text{CH}_4} = 1,$$

тогда

$$V_v^0 = \frac{2 + 7,52}{1} = 9,52 \text{ м}^3/\text{м}^3, \text{ или кмоль/кмоль.}$$

По формуле (1.68) с учетом уравнения (1.67) рассчитываем массу воздуха

$$M_v = 9,52 \frac{0,79 \cdot 28 + 0,21 \cdot 32}{22,4} = 9,52 \cdot 1,28 = 12,2 \text{ кг/м}^3.$$

Ответ. Объем воздуха, необходимый для горения 1 м³ метана при нормальных условиях равен 9,52 м³/м³; масса воздуха 12,2 кг/м³.

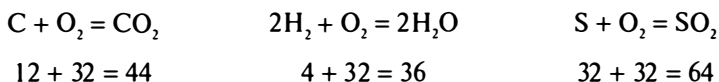
Горючее вещество — сложная смесь химических соединений

К горючим веществам, представляющим сложную смесь химических соединений, относятся: древесина, торф, каменный уголь, нефть и др. При определении теоретически необходимого для их сгорания

объема воздуха нужно знать элементный состав горючего вещества, выраженный в массовых процентах, т. е. содержание элементов С, Н, О, S, N, золы А и влаги W (% масс.).

Элементный состав горючего вещества определяют в аналитической лаборатории, либо пользуются справочными данными.

Для вывода уравнения расчета V_B запишем уравнение реакции горения углерода, водорода и серы и массовое соотношение реагирующих веществ:



Если для сгорания 12 кг углерода требуется 32 кг кислорода, то для 0,01 кг углерода, т. е. его 1 % масс., потребуется кислорода $0,01 \cdot 32/12 = 0,01 \cdot 8/3$ кг, а для водорода соответственно потребуются $0,01 \cdot 32/4 = 0,01 \cdot 8$ кг и для серы $0,01 \cdot 32/32 = 0,01 \cdot 1$ кг кислорода.

Для полного сгорания 1 кг горючего вещества потребуется кислорода (в кг):

$$\frac{8 \cdot 0,01}{3} \cdot [\text{C}] + 8 \cdot 0,01 [\text{H}] + 0,01 [\text{S}] - 0,01 [\text{O}],$$

где [C], [H], [S], [O] — содержание углерода, водорода, серы и кислорода в горючем веществе, % масс.

На вычисленное количество кислорода в воздухе приходится в 78/21 раза больше азота. Сумма азота и кислорода составляет количество воздуха L_B^0 (в кг), необходимого для горения 1 кг вещества:

$$L_B^0 = \left(1 + \frac{78}{21}\right) \left(\frac{8 \cdot 0,01}{3} [\text{C}] + 8 \cdot 0,01 [\text{H}] + 0,01 [\text{S}] - 0,01 [\text{O}]\right).$$

Проведя преобразования, получим:

$$L_B^0 = 0,3478 \left(\frac{[\text{C}]}{3} + [\text{H}] + \frac{[\text{S}]}{8} - \frac{[\text{O}]}{8}\right). \quad (1.71)$$

Чтобы выразить количество воздуха в объемных единицах, нужно выражение (1.71) разделить на массу 1 м³ воздуха при 0 °С и давлении 760 мм рт. ст., т. е. на 1,293 кг/м³. В результате получим выражение (1.72):

$$V_B^0 = 0,269 \left(\frac{[\text{C}]}{3} + [\text{H}] + \frac{[\text{S}]}{8} - \frac{[\text{O}]}{8}\right). \quad (1.72)$$

Пример 3. Определить объем воздуха, необходимый для сгорания 5 кг торфа состава (в %): С — 40,0; Н — 4,0; О — 13,0; N — 20,0; А — 10,0; W — 13,0.

Решение

Азот, зола и влага горючего вещества при определении количества воздуха не учитываются, так как они не принимают участия в реакции. Объем воздуха, необходимый для сгорания 1 кг торфа, определяем по формуле (1.72):

$$V_{\text{в}}^{\circ} = 0,269 \left(\frac{40,0}{3} + 4,0 - \frac{13}{8} \right) = 4,22 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Ответ. Для сгорания 5 кг торфа заданного состава требуется 21,12 м³ воздуха.

Пример 4. Определить объем и массу воздуха, необходимого для горения 1 кг массы углеродного горючего состава: С — 60 %; Н — 5 %; О — 25 %; N — 5 %; W — 5 % (влажность), если коэффициент избытка воздуха $\alpha = 2,5$; температура воздуха 305 К; давление 99 500 Па.

Решение

Горючее вещество имеет сложный состав. Теоретическое количество воздуха при нормальных условиях определяем по формуле (1.72):

$$V_{\text{в}}^{\circ} = 0,269 \left(\frac{60}{3} + 5 - \frac{25}{8} \right) = 5,9 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Далее производим расчет практического количества воздуха по формуле (1.4) (см. подп. 1.2.1 настоящего пособия):

$$V_{\text{в}} = \alpha \cdot V_{\text{в}}^{\circ} = 2,5 \cdot 5,9 = 14,75 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Находим количество воздуха, пошедшего на горение при заданных условиях. Используя формулу (1.66), получим:

$$V_{\text{в}}(p, T) = \frac{14,75 \cdot 101325 \cdot 305}{99500 \cdot 273} = 16,8 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Массу воздуха рассчитываем по формулам (1.68) и (1.69). Отсюда

$$M_{\text{в}}(p, T) = V_{\text{в}} \rho_{\text{в}} = 16,8 \cdot 1,28 \frac{99500 \cdot 273}{305 \cdot 101325} = 18,9 \text{ кг}/\text{кг}.$$

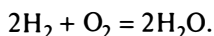
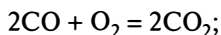
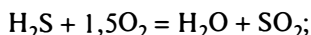
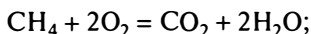
Ответ. Объем и масса воздуха, необходимого для сжигания 1 кг углеродного топлива, составляют 16,8 м³/кг и 18,9 кг/кг, соответственно.

Горючее вещество — смесь газов

В случае если горючее вещество представляет смесь различных газов, расчет теоретически необходимого количества воздуха будет отличаться от методики расчета, приведенной выше.

К группе горючих веществ — смеси газов — относятся горючие газы, например: природный, доменный, коксовый и др. Все они в том или ином количестве содержат CO, CH₄, H₂, H₂S, C₂H₄ и другие компоненты. Состав горючих газов обычно выражают в объемных процентах.

Для вывода формулы расчета теоретически необходимого количества воздуха (V_B^0) напомним уравнение реакции горения наиболее распространенных газов:



Если на сгорание 1 м³ метана требуется 2 м³ кислорода, как это видно из уравнения, то на сгорание 0,01 м³ метана, т. е. 1 % об., потребуется 0,01 · 2 м³ кислорода. Для оксида углерода на сгорание этого же количество потребуется $\frac{0,01}{2}$ м³ кислорода, для водорода — $\frac{0,01}{2}$ м³, а для сероводорода — 0,01 · 1,5 м³.

Для полного сгорания 1 м³ горючего газа потребуется кислорода (в м³):

$$0,01 \cdot 2 [\text{CH}_4] + \frac{0,01}{2} [\text{H}_2] + \frac{0,01}{2} [\text{CO}] + \\ + 0,01 \cdot 1,5 [\text{H}_2\text{S}] - 0,01 [\text{O}_2],$$

где [CH₄], [H₂], [CO], [H₂S], [O₂] — содержание метана, водорода, оксида углерода, сероводорода и кислорода, % об.

В воздухе на этот объем кислорода приходится в 78/21 раза больше азота. Сумма азота и кислорода составляет объем (м^3) воздуха, необходимый для сгорания 1 м^3 газа:

$$V_{\text{в}}^{\circ} = \left(1 + \frac{78}{21} \right) \times \\ \times \left(0,01 \cdot 2 [\text{CH}_4] + \frac{0,01}{2} [\text{H}_2] + \frac{0,01}{2} [\text{CO}] + 0,01 \cdot 1,5 [\text{H}_2\text{S}] - 0,01 [\text{O}_2] \right).$$

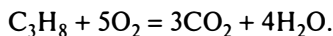
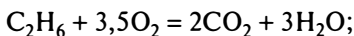
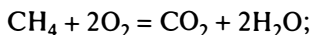
Сделав преобразования, получим:

$$V_{\text{в}}^{\circ} = \frac{2 [\text{CH}_4] + 0,5 [\text{H}_2] + 0,5 [\text{CO}] + 1,5 [\text{H}_2\text{S}] - [\text{O}_2]}{21}. \quad (1.73)$$

Пример 5. Определить объем воздуха при 15°C и давлении 760 мм рт. ст., необходимый для сгорания 1 м^3 природного газа, содержащего (в %): CH_4 (метана) — 86,5; C_2H_6 (этана) — 3; C_3H_8 (пропана) — 1; CO_2 — 7,3; N_2 — 2,2.

Решение

Определяем коэффициенты для метана, этана и пропана по уравнениям реакции горения:



Объем воздуха определяем по уравнению (1.73):

$$V_{\text{в}}^{\circ} = \frac{2 \cdot 86,5 + 3,5 \cdot 3 + 5 \cdot 1}{21} = 8,97 \text{ м}^3.$$

Приводим объем воздуха к заданной температуре (1.66):

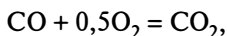
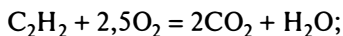
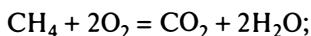
$$V_{\text{в}}^{\circ} = \frac{8,97 \cdot 288 \cdot 760}{273 \cdot 760} = 9,46 \text{ м}^3.$$

Пример 6. Определить объем воздуха, необходимого для 5 м^3 смеси газов, состоящих из 20 % CH_4 ; 40 % C_2H_2 ; 10 % CO ; 5 % N_2 и 25 % O_2 , если коэффициент избытка воздуха равен 1,8.

Решение

Горючее — смесь газов, поэтому для расчета объема воздуха, израсходованного на горение, воспользуемся формулой (1.73). Для оп-

ределения стехиометрических коэффициентов при кислороде n_{O_2} запишем уравнение реакций горения горючих компонентов в кислороде



тогда

$$V_B^o = \frac{2 \cdot 20 + 2,5 \cdot 40 + 0,5 \cdot 10 - 25}{21} = 5,7 \text{ м}^3/\text{м}^3.$$

Для горения 5 м^3 газовой смеси необходимый теоретический объем воздуха составит $V_B^o = 5 \cdot 5,7 = 28,5 \text{ м}^3$.

Практическое количество воздуха: $V_B = 1,8 \cdot 28,5 = 51,3 \text{ м}^3$.

Ответ. Практическое количество воздуха составит $51,3 \text{ м}^3$.

Содержание работы

Задание 1

Рассчитать объем воздуха, теоретически необходимый для сгорания 1 кг березовского угля. Состав его рабочей массы: С — 44,3 %; Н — 3,0 %; N — 0,4 %; O — 14,4 %; W — 8,83 %.

Задание 2

Рассчитать объем воздуха, необходимый для сгорания 1 кг метилового спирта при $20 \text{ }^\circ\text{C}$ и давлении 760 мм рт. ст.

Задание 3

Рассчитать объем воздуха при $15 \text{ }^\circ\text{C}$ и давлении 760 мм рт. ст., необходимый для сгорания 1 м^3 природного газа, содержащего (в %): CH_4 — 92,5; CO_2 — 0,5; N_2 — 7.

Задание 4

Рассчитать объем воздуха, теоретически необходимый для сгорания 1 кг нефти состава органической массы: С — 85 %; Н — 11 %; N — 0,5 %; O — 2,2 %; S — 1,3 %.

Задание 5

Определить объем и массу воздуха, необходимого для горения 1 кг органической массы состава: С — 66 %; Н — 5 %; N — 3 %; O — 20 %;

W — 6 % (влажность), если коэффициент избытка воздуха $\alpha = 1,5$; температура воздуха 305 К, давление 99 700 Па.

Задание 6

Рассчитать объем воздуха, необходимый для горения 5 м³ смеси газов, состоящих из: 20 % CH₄; 40 % C₂H₂; 10 % CO; 5 % N₂ и 25 % O₂, если коэффициент избытка воздуха равен 1,5.

Задание 7

Определить коэффициент избытка воздуха при горении уксусной кислоты (CH₃COOH), если на горение 1 кг поступило 3 м³ воздуха.

Задание 8

Определить объем и массу воздуха, затраченного на горение смеси газов состава: CO — 45 %; N₂ — 15 %; C₂H₈ — 10 %; O₂ — 30 %. Условия нормальные; $\alpha = 1,8$.

Задание 9

Рассчитать объем и массу воздуха, необходимого для сжигания 15 кг топлива сложного состава: С — 70 %; Н — 5 %; О — 20 %; S — 5 %, при температуре 285 К, давлении 100 000 Па, $\alpha = 2,8$.

Задание 10

Определить практически израсходованное количество воздуха для сжигания 1 кг топлива сложного состава: С — 90 %; Н — 3 %; N — 5 %; О — 2 %, при $T = 300$ К, $p = 95\,000$ Па, коэффициент избытка воздуха равен 1,5.

Методические указания

1. Получите задание и исходные данные для выполнения расчета.
2. Ознакомьтесь с методикой расчета теоретически необходимого объема воздуха для сгорания горючих веществ и их смесей.
3. Изучите необходимые для расчетов формулы (1.64)—(1.73).
4. Изучите формулы (1.1)—(1.9) раздела 1.2.1, характеризующие расчет количества воздуха необходимого для горения и расчет коэффициента избытка воздуха.
5. Недостающие для расчетов данные выберите по табл. 5—7, 18, прил. III.

6. Изучите единицы измерения массы и объема по табл. 1—3, прил. I.

Содержание отчета

Отчет должен отвечать требованиям общих методических указаний по выполнению работ.

В отчете привести результаты расчетов и ответы на контрольные вопросы.

Контрольные вопросы

1. Что понимается под теоретически необходимым расходом воздуха на горение?
2. Как определяют теоретически необходимый расход воздуха на горение индивидуального горючего вещества; смеси горючих веществ; смеси горючих газов?
3. Дайте определение коэффициента избытка воздуха.
4. Как рассчитывают коэффициент избытка воздуха, если известно содержание кислорода в продуктах горения?
5. Напишите формулу для расчета коэффициента избытка воздуха, если содержание кислорода в окислительной среде отличается от содержания его в воздухе.
6. Проанализируйте формулы (1.4)—(1.9) и определите факторы, влияющие на определение коэффициента избытка воздуха.

Практическая работа 2 **РАСЧЕТ ОБЪЕМА ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ**

Цель работы: научиться рассчитывать объем продуктов сгорания.

Общие положения

Расчет объема продуктов сгорания зависит от того, является горючее вещество индивидуальным химическим веществом или пред-

ставлено смесью горючих веществ. При расчете объема продуктов сгорания важно учитывать его составную массу, а именно, присутствие в горючем веществе (либо отсутствие) влаги и золы.

Для упрощения расчетов все горючие вещества и материалы подразделены на три типа: *индивидуальные, смесь веществ, смеси горючих газов*.

Горючие вещества могут быть *сухими* и *влажными*.

При отсутствии влаги горючее вещество называют *сухим* или *обезвоженным*.

При наличии влаги горючее вещество называют *влажным*.

Горючее вещество — индивидуальное химическое соединение

Расчет ведут исходя из уравнения реакции горения с учетом влажных или сухих продуктов сгорания единицы массы горючего вещества.

Объем *влажных* продуктов сгорания единицы массы (кг) горючего вещества рассчитывают по формуле

$$V_{п.г} = \frac{(m_{CO_2} + m_{H_2O} + m_{N_2})22,4}{mM}, \quad (1.74)$$

где $V_{п.г}$ — объем влажных продуктов сгорания при нормальных условиях, м³/кг;

m_{CO_2} , m_{H_2O} , m_{N_2} — число киломолей диоксида углерода, паров воды и азота в уравнении реакции горения;

M — количество горючего вещества, численно равное молекулярному весу, кг.

В общем виде формула (1.74) имеет вид:

$$V_{п.г}^0 = \frac{V_0 \sum n_{п.г i}}{n_r M}, \quad (1.75)$$

где $V_{п.г}^0$ — теоретический объем продуктов горения, м³/кг;

$n_{п.г i}$ — количество i -го продукта горения в уравнении реакции, кмоль;

n_r — количество горючего, кмоль;

V_0 — объем Кмоля газа, равный 22,4 м³.

В случае если горючее химическое, вещество является газом (метан, этилен, и т. д.), можно использовать для расчета формулу:

$$V_{\text{п.г}}^0 = \frac{\sum n_{\text{п.г}i}}{n_{\text{г}}}, \quad (1.76)$$

где $V_{\text{п.г}}^0$ — теоретический объем продуктов горения, $\text{м}^3/\text{м}^3$, или $\text{кмоль}/\text{кмоль}$.

Объем продуктов сгорания при заданных условиях определяется выражением:

$$V_{\text{п.г}} = \frac{V_{\text{п.г}}^0 \cdot p \cdot T_{\text{г}}}{p_0 T_0}, \quad (1.77)$$

где T_0 — температура при нормальных условиях, 273 К;

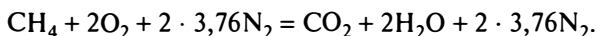
$T_{\text{г}}$ — температура горения, К;

p_0 — нормальное давление, 101,3 кПа.

Пример 1. Определить объем влажных продуктов сгорания 1 м^3 метана.

Решение

Составляем уравнение горения метана в воздухе:



Определяем объем влажных продуктов сгорания метана:

$$V_{\text{CO}_2} = \frac{1 \cdot 22,4}{22,4} = 1 \text{ м}^3/\text{м}^3;$$

$$V_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{2 \cdot 22,4}{22,4} = 2 \text{ м}^3/\text{м}^3;$$

$$V_{\text{N}_2} = \frac{2 \cdot 3,76 \cdot 22,4}{22,4} = 7,52 \text{ м}^3/\text{м}^3.$$

Объем влажных продуктов сгорания 1 м^3 метана равен:

$$V_{\text{п.г}} = 1 + 2 + 7,52 = 10,52 \text{ м}^3/\text{м}^3 \quad \text{или} \quad V_{\text{г}} = \frac{1 + 2 + 7,52}{1} = 10,52 \text{ м}^3/\text{м}^3.$$

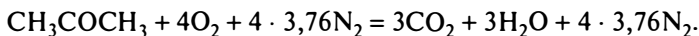
Объем *сухих* продуктов сгорания единицы массы (кг) горючего вещества рассчитывают уже без содержания влаги по формуле:

$$V_{\text{г}} = \frac{(m_{\text{CO}_2} + m_{\text{N}_2}) 22,4}{mM}. \quad (1.78)$$

Пример 2. Определить объем и состав сухих продуктов сгорания 1 кг ацетона.

Решение

Составляем уравнение горения ацетона в воздухе:



Определяем объем и состав сухих продуктов сгорания ацетона ($M = 58$ а. е. м.):

$$V_{\text{CO}_2} = \frac{m_{\text{CO}_2} \cdot 22,4}{mM} = \frac{3 \cdot 22,4}{58} = 1,16 \text{ м}^3/\text{кг}^3;$$

$$V_{\text{N}_2} = \frac{m_{\text{N}_2} \cdot 22,4}{mM} = \frac{4 \cdot 3,76 \cdot 22,4}{58} = 5,8 \text{ м}^3/\text{кг}^3.$$

Исходя из расчетов объем сухих продуктов сгорания равен $1,16 + 5,8 = 6,96 \text{ м}^3/\text{кг}$.

Объем влажных продуктов сгорания 1 м^3 (единицы объема) горючего вещества (газа) можно рассчитать по следующей формуле:

$$V_{\text{п.г}} = \frac{V_{\text{CO}_2} + V_{\text{H}_2\text{O}} + V_{\text{N}_2}}{V} = \frac{m_{\text{CO}_2} \cdot 22,4 + m_{\text{H}_2\text{O}} \cdot 22,4 + m_{\text{N}_2} \cdot 22,4}{m \cdot 22,4} =$$

$$= \frac{m_{\text{CO}_2} + m_{\text{H}_2\text{O}} + m_{\text{N}_2}}{m}, \quad (1.79)$$

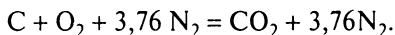
где $V_{\text{п.г}}$ — объем влажных продуктов сгорания 1 м^3 горючего газа, $\text{м}^3/\text{м}^3$;

m_{CO_2} , $m_{\text{H}_2\text{O}}$, m_{N_2} — число молей диоксида углерода, паров воды и азота;

m — число молей горючего газа.

Горючее вещество — сложная смесь химических соединений

Если известен элементный состав сложного горючего вещества, то состав и количество продуктов сгорания 1 кг вещества можно определить по уравнению реакции горения отдельных элементов. Для этого составляем уравнения реакции горения углерода, водорода, серы и определяем объем продуктов сгорания, приходящийся на 1 кг горючего вещества. Уравнение реакции горения углерода имеет вид:



Произведем расчеты по аналогии с представленными в предыдущем разделе. Тогда при сгорании 1 кг углерода получается (согласно (1.78)) $22,4/12 = 1,86 \text{ м}^3 \text{ CO}_2$ и $22,4 \cdot 3,76/12 = 7,0 \text{ м}^3 \text{ N}_2$.

Аналогично определяют объем (в м^3) продуктов сгорания 1 кг серы и водорода 1.79. Полученные расчетные данные сведены по другим элементам горючего вещества ниже в табл. 1.17.

Таблица 1.17. Объем (в м^3) продуктов сгорания 1 кг сухого горючего вещества

Горючее вещество	Продукты сгорания			
	CO_2	N_2	H_2O	SO_2
Углерод	1,86	7,0	—	—
Водород	—	21,0	11,2	—
Сера	—	2,63	—	0,7

При горении углерода, водорода и серы кислород поступает из воздуха. Однако в состав горючего вещества может входить кислород, который также принимает участие в горении. В этом случае воздуха на горение вещества расходуется соответственно меньше.

В составе горючего вещества могут находиться азот и влага, которые в процессе горения переходят в продукты сгорания. Для их учета необходимо знать объем 1 кг азота и паров воды при $0 \text{ }^\circ\text{C}$ и давлении 760 мм рт. ст. Объем 1 кг азота равен $0,8 \text{ м}^3$, а паров воды — $1,24 \text{ м}^3$. Следовательно, в воздухе на 1 кг кислорода приходится при нормальных условиях ($0 \text{ }^\circ\text{C}$ и давление 760 мм рт. ст.) $3,76 \cdot 22,4/32 = 2,63 \text{ м}^3$ азота.

На основании приведенных данных определяем состав и объем продуктов сгорания 1 кг горючего вещества.

В общем виде, с учетом полученных данных (табл. 1.17), формулы для расчета горючих веществ сложного состава имеют вид:

$$V_{\text{CO}_2} = 1,86 \frac{C}{100}; \quad (1.80)$$

$$V_{\text{H}_2\text{O}} = 11,2 \frac{H}{100} + 1,24 \frac{W}{100}; \quad (1.81)$$

$$V_{\text{SO}_2} = 0,7 \frac{S}{100}; \quad (1.82)$$

$$V_{\text{N}_2} = \frac{1}{100} \left[7C + 21 \left(H - \frac{O}{8} \right) + 2,63S + 0,8N \right], \quad (1.83)$$

где V_{CO_2} , $V_{\text{H}_2\text{O}}$, V_{SO_2} , V_{N_2} — объем газов, выделяющихся при сгорании сложных горючих веществ, м³/кг; кмоль/кг;

C, H, S, O, N — содержание соответствующих элементов (углерода, водорода, серы, кислорода и азота) в горючем веществе, % масс.

Пример 3. Определить объем и состав влажных продуктов сгорания 1 кг каменного угля состава (в %): C — 75,8; H — 3,8; O — 2,8; N — 1,1; S — 2,5; W — 3,0; A — 11,0.

Решение

Рассчитываем состав горючего вещества и объем влажных продуктов сгорания. Для этого воспользуемся данными, рассчитанными выше по формулам (1.74), (1.78), (1.79) и сведенными в табл. 1.11.

Объем углекислого газа 1,86 м³ (при сгорании сухого вещества, табл. 1.17) умножить на состав углерода (75,8/100), получится 1,4 м³. Аналогично приводим расчеты для других продуктов сгорания (табл. 1.18).

Таблица 1.18. Объем (в м³) продуктов сгорания 1 кг влажного горючего вещества

Горючее вещество	Продукты сгорания			
	CO ₂	H ₂ O	N ₂	SO ₂
Углерод	$1,86 \cdot 0,758 =$ $= 1,4$	—	$7 \cdot 0,758 =$ $= 5,306$	—
Водород	—	$11,2 \cdot 0,038 =$ $= 0,425$	$21 \cdot 0,038 =$ $= 0,798$	—
Сера	—	—	$2,63 \cdot 0,025 =$ $= 0,658$	$0,7 \cdot 0,025 =$ $= 0,017$
Азот в горючем веществе	—	—	$0,8 \cdot 0,011 =$ $= 0,0088$	—
Влага в горючем веществе	—	$1,24 \cdot 0,03 =$ $= 0,037$	—	—
Сумма	1,4	0,462	$6,7708 - 0,0736 =$ $= 6,6972$	0,017

Далее из общего объема азота (6,7708 м³) вычитают объем азота, приходящийся на кислород в составе каменного угля ($2,8/100 \times 2,63$) = 0,0736 м³. Итог таблицы указывает состав продуктов сгора-

ния каменного угля. Объем влажных продуктов сгорания 1 кг каменного угля равен:

$$V_{п.г} = 1,4 + 0,462 + 6,6972 + 0,017 = 8,576 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Горючее вещество — смесь газов

Количество и состав продуктов сгорания для смеси газов определяют по уравнению реакции горения компонентов, составляющих смесь, по формуле:

$$V_{п.г}^o = \sum V_{п.г i}, \quad (1.84)$$

где $V_{п.г i}$ — объем i -го компонента (продукты реакции), $\text{м}^3/\text{м}^3$; кмоль/кмоль.

В случае если в газовой смеси содержится негорючее вещество, используют выражение:

$$V_{п.г i} = \frac{1}{100} \left[\frac{\sum n_{п.г i} \Phi_{г i}}{n_{г}} + \sum \Phi_{н.г i} \right], \quad (1.85)$$

где $V_{п.г i}$ — объем i -го продукта реакции горения;

$n_{п.г i}$ — количество i -го продукта горения в уравнении реакции, кмоль;

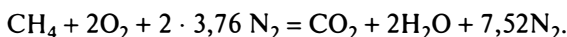
$n_{г}$ — количество горючего, кмоль.

$\Phi_{г i}$ — содержание i -го горючего компонента в газовой смеси, % об;

$\Phi_{н.г i}$ — содержание i -го негорючего компонента в газовой смеси, % об.

Рассмотрим на примере горения метана методику определения продуктов его сгорания.

Горение метана протекает по следующему уравнению:



Согласно нему при сгорании 1 м^3 метана получается 1 м^3 диоксида углерода, 2 м^3 паров воды и 7,52 м^3 азота. Аналогично приведенным выше расчетам определяем объем (м^3) продуктов сгорания 1 м^3 различных газов. Полученные данные сведены в табл. 1.19.

На основании приведенных данных определяем состав и количество продуктов сгорания смеси газов.

Таблица 1.19. Объем (в м³) продуктов сгорания 1 кг смеси горючих газов

Горючее вещество	Продукты сгорания			
	CO ₂	H ₂ O	N ₂	SO ₂
Водород	—	1,0	1,88	—
Оксид углерода	1,0	—	1,88	—
Сероводород	—	1,0	5,64	1,0
Метан	1,0	2,0	7,52	—
Ацетилен	2,0	1,0	9,4	—
Этилен	2,0	2,0	11,28	—

Пример 4. Определить объем влажных продуктов сгорания 1 м³ доменного газа следующего состава (в %): CO₂ — 10,5; CH₄ — 0,3; CO — 28; N₂ — 58,5; H₂ — 2,7.

Решение

Объем продуктов сгорания газов, выделившихся при горении (в м³), рассчитываем по (1.79). Полученные данные сводим в табл. 1.20.

Таблица 1.20. Объем продуктов сгорания 1 м³ горючих газов

Горючее вещество	Продукты сгорания		
	CO ₂	H ₂ O	N ₂
Водород	—	$1 \cdot 0,027 = 0,027$	$1,88 \cdot 0,027 = 0,05$
Оксид углерода	$1 \cdot 0,28 = 0,28$	—	$1,88 \cdot 0,28 = 0,526$
Метан	$1 \cdot 0,003 = 0,003$	$2 \cdot 0,003 = 0,006$	$7,52 \cdot 0,003 = 0,022$
Диоксид углерода в составе газа	0,105	—	—
Азот в составе газа	—	—	0,585
Сумма	0,388	0,033	1,183

Объем продуктов сгорания 1 м³ доменного газа равен:

$$V_r = 0,388 + 0,033 + 1,183 = 1,604 \text{ м}^3/\text{м}^3.$$

Содержание работы

Задание 1

Рассчитайте объем и определите состав влажных продуктов сгорания смеси природного газа (80 %) с этиленом (20 %).

Задание 2

Какое количество продуктов горения выделится при сгорании 1 м^3 ацетилена (C_2H_2) в воздухе, если температура горения составила 1450 К ?

Задание 3

Рассчитайте объем и состав сухих продуктов сгорания 1000 м^3 природного газа.

Задание 4

Рассчитайте объем и состав сухих и влажных продуктов сгорания 1 т метанола.

Задание 5

Рассчитайте объем и состав влажных продуктов сгорания коксового газа.

Задание 6

Определите объем продуктов сгорания 1 кг фенола $\text{C}_6\text{H}_5\text{OH}$, если температура горения 1200 К , давление $95\,000 \text{ Па}$.

Задание 7

Рассчитайте объем и состав водяного газа.

Задание 8

Определите объем продуктов горения при сгорании 10 кг органического топлива состава: $\text{C} - 55 \%$, $\text{O} - 13 \%$, $\text{H} - 5 \%$, $\text{S} - 7 \%$, $\text{N} - 3 \%$, W (влага) — 17% , если температура горения 1170 К .

Задание 9

Рассчитайте практический объем продуктов горения, полученный при сгорании 1 кг органической массы состава: $\text{C} - 50 \%$, $\text{O} - 13 \%$, $\text{H} - 8 \%$, $\text{S} - 7 \%$, $\text{N} - 6 \%$, W (влага) — 17% , если температура горения 1190 К , коэффициент избытка воздуха — $1,3$.

Задание 10

Определите объем продуктов горения при сгорании 1 м^3 газовой смеси, состоящей из $\text{C}_3\text{H}_6 - 70 \%$, $\text{C}_3\text{H}_8 - 10 \%$, $\text{CO} - 5 \%$, $\text{O}_2 - 15 \%$, если $T_{\text{гор}} = 1300 \text{ К}$, коэффициент избытка воздуха $\alpha = 2,8$; температура окружающей среды 298 К .

Методические указания

1. Получите задание и исходные данные для выполнения расчета.
2. Подробно изучите методики расчетов объема газообразных продуктов сгорания простых горючих веществ и их смесей.
3. Внимательно изучите необходимые для расчетов формулы (1.74)—(1.85).
4. Проанализируйте формулы расчета объема продуктов сгорания (1.10)—(1.17) раздела 1.2.2.
5. Недостающие для расчетов данные: молекулярные массы, состав горючих газов выберите по табл. 2, 7, прил. III.
6. Изучите единицы измерения массы и объема по табл. 1—3, Прил. I.

Содержание отчета

Отчет должен отвечать требованиям общих методических указаний по выполнению работ.

В отчете приведите результаты расчетов и ответы на контрольные вопросы.

Контрольные вопросы

1. Поясните, от чего зависит использование различных методик для расчета объема продуктов сгорания.
2. Как определяют объем продуктов сгорания индивидуального горючего вещества; смеси горючих веществ; смеси горючих газов?
3. Поясните, что понимается под сухими и влажными продуктами сгорания горючих веществ?
4. Влияет ли избыток воздуха на объем продуктов сгорания?
5. Что такое дым? Поясните.

Практическая работа 3 РАСЧЕТ ТЕПЛОТЫ ГОРЕНИЯ

Цель работы: научиться рассчитывать теплоту сгорания индивидуального горючего вещества и горючей смеси.

Общие положения

Основная доля теплоты, выделяющейся в процессе горения горючих веществ, поступает в зону горения за счет тепловыделения. Тепловыделение происходит в результате химической реакции горючего с окислителем. Причем разные горючие вещества при сгорании выделяют различное количество теплоты.

Вспомним определение, рассмотренное в разделе 1.5.

Количество теплоты, выделяющейся при сгорании единицы массы вещества или единицы объема горючего вещества с образованием продуктов полного горения, называется теплотой горения и обозначается $Q_{\text{гор}}$.

При расчетах теплоты горения важно различать низшую и высшую теплоты, отличие между которыми заключается в следующем:

- **высшая теплота** горения учитывает теплоту конденсации паров воды, входящих в состав продуктов горения, обозначается $Q_{\text{в}}$;
- **низшая теплота** горения учитывает теплоту газообразных паров воды в продуктах сгорания, обозначается $Q_{\text{н}}$.

В основу расчетных методов определения теплоты сгорания положены закон Гесса и формулы Д.И. Менделеева (1.24) и (1.25), приведенные в разделе 1.5.

Рассмотрим методы расчета теплоты горения индивидуального горючего вещества.

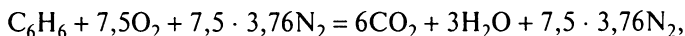
Низшую теплоту горения $Q_{\text{н}}$ индивидуального химического горючего вещества определяют по закону Гесса, записав предварительно уравнение реакции горения этого вещества.

Следует помнить, что стандартные теплоты образования простых веществ (O_2 , N_2 и т. д.) равны нулю.

Пример 1. Рассчитать по закону Гесса низшую теплоту горения бензола (кДж/моль; кДж/кг; кДж/м³).

Решение

1. Запишем уравнение реакции горения бензола в воздухе:



отсюда стехиометрические коэффициенты равны:

$$m_{\text{CO}_2} = 6; \quad m_{\text{H}_2\text{O}} = 3; \quad n_{\text{C}_6\text{H}_6} = 1.$$

2. Уравнение закона Гесса для этого случая будет выглядеть так (см. (1.23)):

$$Q_{\text{н}} = m_{\text{CO}_2} \cdot \Delta H_{\text{CO}_2} + m_{\text{H}_2\text{O}} \cdot \Delta H_{\text{H}_2\text{O}} - n_{\text{C}_6\text{H}_6} \cdot \Delta H_{\text{C}_6\text{H}_6},$$

отсюда вычислим низшую теплоту горения в кДж/моль.

Значение величины теплосодержания ΔH_f для CO_2 , H_2O принимаем по табл. 18, а для C_6H_6 (бензола) — по табл. 3, прил. III:

$$\begin{aligned} Q_{\text{н}} &= 6 \cdot 396,9 + 3 \cdot 242,2 - (-34,8) = \\ &= 3142,8 \text{ кДж/моль} = 3142,8 \cdot 10^3 \text{ Дж/кмоль}. \end{aligned}$$

3. Низшую теплоту горения ΔH_f для продуктов: CO_2 , H_2O , полученных при сгорании 1 кг бензола, определим исходя из закона Авогадро и определения киломоля.

Закон Авогадро: 1 кмоль вещества при нормальных условиях занимает объем 22,4 м³.

Киломоль химического вещества равен его молекулярной массе. Следовательно, при сгорании 1 кмоль бензола, равного 78 кг бензола выделяется теплота $Q_{\text{н}} = 3142,8 \cdot 10^3$ кДж/кмоль. Пересчитаем, сколько выделится теплоты ($Q'_{\text{н}}$) при сгорании 1 кг бензола:

$$Q'_{\text{н}} = \frac{Q_{\text{н}}}{\text{Мол. масса}} = \frac{3142,8 \cdot 10^3}{78} = 40\,292,3 \text{ кДж/кг}.$$

4. Теплоту горения 1 м³ паров бензола при нормальных условиях определим, используя следствие из закона Авогадро. При сгорании 1 кмоль = 22,4 м³ паров выделяется теплота $3142,8 \cdot 10^3$ кДж/кмоль. При сгорании 1 м³ паров выделяется теплота, равная:

$$Q''_{\text{н}} = \frac{Q_{\text{н}}}{22,4} = \frac{3142,8 \cdot 10^3}{22,4} = 140303,6 \text{ кДж/м}^3.$$

Ответ. Теплота горения 1 м³ паров бензола при нормальных условиях равна 140 303,6 кДж; теплота горения 1 кг бензола равна 40,292 кДж.

Если горючая смесь представляет собой сложную смесь химических веществ, то для определения теплоты горения (низшей и высшей) используют формулы Д.И. Менделеева (1.24), (1.25). Соотношение ме-

жду низшей и высшей теплотами горения представлены в разделе 1.5, формулы (1.21) и (1.22).

Пример 2. Определить по формулам Д. И. Менделеева низшую и высшую теплоты горения 4-метил-5-β-оксиэтилтиазола (C_6H_9ONS).

Решение

1. Определим массовый состав вещества с учетом количества атомов химического элемента в молекуле по табл. 7, прил. III:

$$M = 12 \cdot 6 + 1 \cdot 9 + 1 \cdot 16 + 1 \cdot 14 + 1 \cdot 32 = 143 \text{ а. е. м.} - 100 \%;$$

$$12 \cdot 6 - C \%;$$

$$1 \cdot 9 - H \%;$$

$$1 \cdot 16 - O \%;$$

$$1 \cdot 14 - N \%;$$

$$1 \cdot 32 - S \%,$$

откуда процентное соотношение элементов в молекуле составляет:

$$C = 12 \cdot 6 \cdot 100/143 = 50,3 \%;$$

$$H = 1 \cdot 9 \cdot 100/143 = 6,3 \%;$$

$$O = 1 \cdot 16 \cdot 100/143 = 11,2 \%;$$

$$N = 1 \cdot 14 \cdot 100/143 = 9,8 \%;$$

$$S = 1 \cdot 32 \cdot 100/143 = 22,4 \%.$$

1. Зная процентное содержание химических элементов в горючем веществе, определим низшую теплоту горения вещества по (1.25):

$$Q_H = 339,4 \cdot 50,3 + 1257 \cdot 6,3 - 108,9(11,2 + 9,8 - 22,4) - \\ - 25,1(9 \cdot 6,3 + 0) = 23720,2 \text{ кДж/кг.}$$

2. Высшую теплоту горения определим по (1.24):

$$Q_B = 339,4 \cdot 50,3 + 1257 \cdot 6,3 - 108,9(11,2 + 9,8 - 22,4) = \\ = 25 \ 143,38 \text{ кДж/кг.}$$

Ответ. Низшая теплота горения 4-метил-5-β-оксиэтилтиазола равна 23 720,2 кДж/кг; высшая — 25 143,38 кДж/кг.

Определение теплоты горения **смеси горючих газов** сводится к тому, что теплота горения определяется как сумма теплот горения горючих компонентов смеси:

$$Q_H^{cm} = \sum_{i=1}^l Q_{H_i} \frac{\varphi_i}{100}, \quad (1.86)$$

где Q_{H_i} — низшая теплота горения i -го горючего компонента газовой смеси, кДж/м³; кДж/моль;

φ_i — содержание i -го горючего компонента в газовой смеси, объёмные проценты;

l — число горючих компонентов газовой смеси.

Пример 3. Определить низшую теплоту горения (кДж/м³; кДж/кмоль) газовой смеси, имеющий следующий состав компонентов смеси:

$$\begin{aligned} \varphi_{\text{CO}} &= 20 \% ; \quad \varphi_{\text{H}_2} = 10 \% ; \quad \varphi_{\text{CH}_4} = 20 \% ; \quad \varphi_{\text{C}_2\text{H}_6} = 20 \% ; \\ \varphi_{\text{CO}_2} &= 10 \% ; \quad \varphi_{\text{N}_2} = 10 \% ; \quad \varphi_{\text{O}_2} = 10 \% ; \end{aligned}$$

Условия нормальные: 0 °С (273 К); 760 мм рт. ст. (101 кПа).

Решение

1. По (1.86) рассчитываем теплоту горения 1 м³ смеси, если теплоты горения компонентов имеют следующие значения:

$$\begin{aligned} Q_{\text{HCO}} &= 12\,650 \text{ кДж/м}^3; \quad Q_{\text{HH}_2} = 10\,770 \text{ кДж/м}^3; \\ Q_{\text{HCH}_4} &= 35\,820 \text{ кДж/м}^3; \quad Q_{\text{HC}_2\text{H}_6} = 63\,690 \text{ кДж/м}^3. \end{aligned}$$

Отсюда

$$\begin{aligned} Q_{\text{H}}^{\text{см}} &= Q_{\text{HCO}} \frac{\varphi_{\text{CO}}}{100} + Q_{\text{HH}_2} \frac{\varphi_{\text{H}_2}}{100} + Q_{\text{HCH}_4} \frac{\varphi_{\text{CH}_4}}{100} + Q_{\text{HC}_2\text{H}_6} \frac{\varphi_{\text{C}_2\text{H}_6}}{100}; \\ Q_{\text{H}}^{\text{см}} &= \frac{12650 \cdot 20}{100} + \frac{10770 \cdot 10}{100} + \frac{35820 \cdot 20}{100} + \frac{63690 \cdot 20}{100} = \\ &= 23\,509 \text{ кДж/м}^3. \end{aligned}$$

2. Теплоту горения 1 моля газовой смеси найдем, используя следствие из закона Авогадро (1 Кмоль газа при нормальных условиях занимает объем 22,4 м³):

$$Q_{\text{H}}^{\text{см}} = \frac{23\,509 \cdot 22,4}{1000} = 526,6 \text{ кДж/моль.}$$

Ответ. Низшая теплота горения 1 м³ газовой смеси составляет 63 690 кДж, а 1 моля этой смеси — 526,6 кДж.

Пример 4. Определить низшую теплоту горения газовой смеси, состоящей из CH₄ — 40 %, C₄H₁₀ — 20 %, O₂ — 15 %, H₂S — 5 %, NH₃ — 10 %, CO₂ — 10 %.

Решение. Для каждого горючего компонента смеси по формуле (1.23) находим теплоту горения и сводим данные в табл. 1.21. Дан-

Таблица 1.21. Теплота горения горючих веществ

Уравнение реакции	Теплота образования горючего, 10^{-3} кДж/кмоль	Теплота горения, 10^{-3} кДж/кмоль
$\text{CH}_4 + 2\text{O}_2 = \text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$	75	$Q_{\text{н}} = 1 \cdot 396,9 + 2 \cdot 242,2 - 75 = 806,3$
$\text{C}_4\text{H}_{10} + 6,5 \text{O}_2 = 4\text{CO}_2 + 5\text{H}_2\text{O}$	132,4	$Q_{\text{н}} = 4 \cdot 396,9 + 5 \cdot 242,2 - 132,4 = 2666,1$
$\text{H}_2\text{S} + 1,5\text{O}_2 = \text{H}_2\text{O} + \text{SO}_2$	201,1	$Q_{\text{н}} = 242,2 + 297,5 - 201,1 = 338,6$
$\text{NH}_3 + 0,75\text{O}_2 = 1,5\text{H}_2\text{O} + 0,5\text{N}_2$	46,1	$Q_{\text{н}} = 1,5 \cdot 242,2 - 46,1 = 317,2$

ные теплот образования, необходимые для расчетов, берем из табл. 9 и 18, прил. III.

По (1.86) определим теплоту горения газовой смеси:

$$Q_{\text{н}} = 0,01 (806,3 \cdot 40 + 2666,1 \cdot 20 + 338,6 \cdot 5 + 317,2 \cdot 10) 10^{-3} = 904,39 \cdot 10^{-3} \text{ кДж/кмоль.}$$

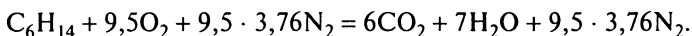
Для определения теплоты горения 1 м^3 газовой смеси необходимо полученное значение разделить на объем, занимаемый 1 кмоль газа при стандартных условиях ($22,4 \text{ м}^3$):

$$Q_{\text{н}} = 904,39 \cdot 10^{-3} / 22,4 = 40,375 \cdot 10^{-3} \text{ кДж/м}^3.$$

Ответ. Низшая теплота горения газовой смеси составляет $40,375 \cdot 10^{-3} \text{ кДж/м}^3$.

Пример 5. Рассчитать теплоту горения 1 м^3 стехиометрической гексано-воздушной смеси.

Решение. Находим стехиометрический состав горючей смеси по уравнению реакции горения:



Весь объем вступивших в реакцию компонентов ($1 + 9,5 + 9,5 \cdot 3,76$) принимаем за 100 %, а количество горючего (1 кмоль) будет соответствовать стехиометрической концентрации:

$$\varphi_{\text{г}} = 1 \cdot 100 / (1 + 9,5 + 9,5 \cdot 3,76) = 2,2 \text{ \%}.$$

Теплоту сгорания 1 м^3 гексана определяем по (1.23). Данные для расчета берем из табл. 9, 18, прил. III:

$$Q_{\text{н}} = 6 \cdot 396,9 + 7 \cdot 242,2 - 167,2 = 3909,6 \text{ кДж/моль};$$

$$Q_{\text{н}} = 3909,6 / 22,4 \cdot 10^3 = 174,5 \cdot 10^3 \text{ кДж/м}^3.$$

Учитывая, что объем 1 кмоль газа при стандартных условиях равен 22,4 л, определяем теплоту сгорания 1 м^3 стехиометрической гексано-воздушной смеси по (1.86):

$$Q_{\text{н}}^{\text{см}} = 174,5 \cdot 10^3 \cdot 2,2 / 100 = 3839 \text{ кДж/м}^3.$$

Ответ. Теплота горения гексано-воздушной смеси 3839 кДж/м^3 .

Содержание работы

Задание 1

Используя закон Гесса, рассчитать теплоту горения этана, если теплота его образования $Q = 20,2 \text{ ккал/моль}$.

Задание 2

Рассчитать $Q_{\text{н}}$ и $Q_{\text{в}}$ для этана, используя формулу Д.И. Менделеева.

Задание 3

Рассчитать низшую теплоту горения сернистого мазута, имеющего состав (в %): С — 82,5; Н — 10,65; S — 3,1; О — 0,5; А (зола) — 0,25; W (влага) — 3.

Задание 4

Рассчитать высшую теплоту горения нефтяной фракции, имеющей следующий состав (в %): С — 84,5; Н — 11,21; S — 3,99; О — 0,3.

Задание 5

Определить низшую теплоту горения уксусной кислоты (CH_3COOH), если теплота ее образования $485,6 \text{ кДж/моль}$.

Задание 6

Определить низшую теплоту горения 1 кг древесины состава С — 49 %, Н — 8 %, О — 43 %. Какова удельная интенсивность тепловыделения, если массовая скорость выгорания составляет $0,01 \text{ кг}/(1 \text{ м}^2 \cdot \text{с})$?

Задание 7

Рассчитать интенсивность тепловыделения при горении газовой смеси составе: CO — 15 %, C_4H_{10} — 40 %, O_2 — 20 %, H_2 — 14 %, CO_2 — 11 %, если массовая скорость выгорания $0,8 \text{ м}^3/\text{с}$.

Задание 8

Определить низшую теплоту горения газовой смеси ($\text{кДж}/\text{м}^3$; $\text{кДж}/\text{кмоль}$) при нормальных условиях, имеющей следующий состав (% об.):

$$\varphi_{\text{CO}} = 18\%; \varphi_{\text{H}_2} = 12\%; \varphi_{\text{CO}_2} = 8\%; \varphi_{\text{N}_2} = 14\%;$$

$$\varphi_{\text{этана}} = 22\%; \varphi_{\text{пропана}} = 16\%; \varphi_{\text{O}_2} = 10\%.$$

Задание 9

Рассчитать низшую теплоту горения пропано-бутановой смеси ($\text{кДж}/\text{м}^3$; $\text{кДж}/\text{кмоль}$), имеющей следующий состав при нормальном давлении (в % об.):

$$\varphi_{\text{CO}} = 9\%; \varphi_{\text{H}_2} = 8\%; \varphi_{\text{CO}_2} = 11\%; \varphi_{\text{N}_2} = 10\%;$$

$$\varphi_{\text{бутана}} = 22\%; \varphi_{\text{пропана}} = 30\%; \varphi_{\text{O}_2} = 10\%.$$

Методические указания

1. Получите задание и исходные данные для выполнения расчета.
2. Ознакомьтесь с основными понятиями процесса горения по разделам 1.1 и 1.5.
3. Изучите формулы, используемые для расчетов теплот горения, (1.21)—(1.28).
4. Изучите по разделу 1.5 методы расчета теплоты горения с использованием закона Гесса по (1.19), (1.20) и формулы Д.И. Менделеева (1.24)—(1.25).
5. Недостающие для расчетов данные примите по табл. 3, 7, 9 и 18, прил. III.
6. Произведите расчеты, используя нужные для полученного задания формулы (см. раздел 1.5) или формулу (1.86) и оформите отчет.

Содержание отчета

Отчет должен отвечать требованиям общих методических указаний по выполнению работ.

В отчете приведите результаты расчетов и ответы на контрольные вопросы.

Контрольные вопросы

1. Дайте определение понятия теплоты сгорания.
2. Что понимается под низшей и высшей теплотами сгорания горючих веществ?
3. Поясните на примерах использование закона Гесса для расчета $Q_{\text{н}}$, $Q_{\text{в}}$. В чем заключается его сущность?
4. Напишите формулу Д.И. Менделеева для определения низшей и высшей теплот сгорания.
5. Напишите формулу для расчета теплоты сгорания газозвоздушной смеси.
6. От чего зависит скорость тепловыделения? Подтвердите формулой.
7. Какова формула расчета интенсивности тепловыделения?

Практическая работа 4 РАСЧЕТ ТЕМПЕРАТУРЫ ГОРЕНИЯ

Цель работы: научиться рассчитывать температуру горения горючих веществ.

Общие положения

Горение горючих веществ и материалов происходит в результате нагревания их источником зажигания, т. е. теплом, поступающим из внешней среды. Кроме того, нагревание осуществляется также теплом, выделяющимся в зоне горения.

Температура горения — температура (зоны пламени), до которой нагреваются продукты реакции горения. Это максимальная температура зоны химической реакции (зоны пламени).

Температуру горения рассчитывают по (1.29), используя уравнение теплового баланса (1.30):

$$Q_{\text{п.г}}^{T_{\text{г}}} = \sum_{i=1}^k V_{\text{п.г.}i} C_{p_i} (T_{\text{г}} - T_0),$$

Для удобства вычислений значения удельных теплосодержаний (энтальпий) компонентов горения при различных температурах приведены в табл. 20 (кДж/кмоль) и табл. 21 (кДж/м³), прил. III.

Расчет температуры горения может быть произведен только методом последовательных приближений, поскольку теплоемкость газов зависит от температуры горения.

Для расчета температуры горения требуется определить параметры, сведенные в табл. 1.22.

Таблица 1.22. Схема расчета температуры горения

Определяемые параметры	Примечание
1. Объем и состав продуктов горения	Кмоль; м ³ (см. практическую работу 2)
2. Низшая теплота горения или количество теплоты, пошедшей на нагрев продуктов горения (при наличии теплотоперь)	$Q_{п.г}$ или Q_n , кДж/моль, кДж/кг (см. практическую работу 3)
3. Среднее значение энтальпии продуктов горения	$H_{ср} = \frac{Q_{н(п.г)}}{\sum V_{п.г}}$ (1.87)
4. Температура горения T_1 (табл. 19–20, прил. III по средней энтальпии, если $H_{ср}$ выражена в кДж/м ³), ориентируясь на азот (наибольшее содержание в продуктах горения)	
5. Теплосодержание продуктов горения с температурой T_1 (табл. 19–20, прил. III)	$Q'_{п.г} = \sum H_i V_{п.г}$ (1.88)
6. Если $Q'_{п.г} < Q_{н(п.г)}$, то $T_2 > T_1$ (в том случае, если $Q'_{п.г} > Q_{н(п.г)}$, то $T_2 < T_1$)	H_i — энтальпия i -го продукта горения; V_i — объем i -го продукта горения
7. $Q''_{п.г}$ по (1.88)	
8. Расчет проводим до получения неравенства $Q'_{п.г} < Q_{н(п.г)} < Q''_{п.г}$	
9. Температура горения	$T_g = T_1 + \frac{(Q_{н(п.г)} - Q'_{п.г})(T_2 - T_1)}{Q''_{п.г} - Q'_{п.г}}$ (1.89)

Действительная температура горения на пожаре для большинства газообразных, жидких и твердых веществ изменяется в достаточно узких пределах (1300–1800 К). В связи с этим расчетная оценка действительной температуры горения может быть значительно упрощена,

если теплоемкость продуктов горения выбирать при температуре 1500 К:

$$T_{п.г} = T_0 + \frac{Q_n}{\sum C_{p_i}^* V_{п.г i}}, \quad (1.90)$$

где $C_{p_i}^*$ — теплоемкость i -го продукта горения при 1500 К (табл. 1.23).

Таблица 1.23. Теплоемкость некоторых горючих газов

Вещество	Теплоемкость	
	кДж/м ³ · К	кДж/моль · К
CO ₂	2,27	50,85 · 10 ⁻³
SO ₂	2,28	51,07 · 10 ⁻³
H ₂ O (пар)	1,78	39,87 · 10 ⁻³
N ₂	1,42	31,81 · 10 ⁻³
Воздух	1,44	32,26 · 10 ⁻³

Более подробно метод определения температуры горения рассмотрим в следующих примерах.

Пример 1. Определить действительную температуру горения древесины состава: С — 45 %; Н — 5,0 %; S — 0 %; О — 35 %; N — 1 %; А — 4 %; W — 10 %, если горение протекает при $\alpha_b = 1,4$. Недожог составляет 5 % Q_n , а потери теплоты излучением составляют 10 % Q_n . Начальные условия — нормальные (см. прил. II).

Решение

1. Определяем количество теплоты, затраченной на нагрев продуктов горения, по уравнению материально-теплового баланса:

$$Q_{п.г} = (Q_n + Q_{исх} - Q_{недож} - Q_{пот}), \quad (1.91)$$

где Q_n — низшая теплота горения;

$Q_{исх} = 0$, так как начальные условия нормальные, $T_0 = 273$ К;

$Q_{недож}$ — теплота недожога;

$Q_{пот}$ — теплота потери излучением.

Вычисляем количество теплоты, затраченной на нагрев продуктов горения:

$$Q_{п.г} = Q_n + (0 - 0,5Q_n - 0,1Q_n) = 0,85Q_n.$$

2. По формуле Д. И. Менделеева (1.25) находим низшую теплоту горения древесины:

$$Q_{\text{н}} = 339,4 \cdot 45 + 1257 \cdot 5 - 108,9(1 + 35 - 0) - 25,1(9 \cdot 5 + 10) = \\ = 16\,257,1 \text{ кДж/кг};$$

$$Q_{\text{п.г}} = 0,85 \cdot 24\,097,9 = 13\,818,54 \text{ кДж/кг}.$$

Таким образом, на нагрев продуктов горения 1 кг древесины будет затрачено 13 818,54 кДж тепла.

3. Определяем объем и состав продуктов горения 1 кг древесины.

При сжигании древесины образуются углекислый газ (CO_2), вода (H_2O), и остается азот (N_2).

Объем продуктов сгорания определяем из (1.33) раздела 1.6, отсюда имеем:

$$V_{\text{п.г}} = \frac{q}{C'_p T_{\text{гор}}},$$

где q — теплосодержание продуктов сгорания; кДж/моль; кДж/кг (табл. 20, 21, прил. III);

C'_p — средняя теплоемкость продуктов сгорания кДж/($\text{м}^3 \cdot \text{К}$), ккал/($\text{м}^3 \cdot \text{град.}$) (табл. 19, прил. III).

Объем продуктов сгорания 1 кг сложной смеси горючих веществ приводится в табл. 1.17 (практическая работа 2). Отсюда имеем:

$$V_{\text{CO}_2} = 1,86 \cdot 45/100 = 0,84 \text{ м}^3/\text{кг};$$

$$V_{\text{H}_2\text{O}} = 11,2 \cdot 5/100 + 1,24 \cdot 10/100 = 0,68 \text{ м}^3/\text{кг};$$

$$V_{\text{N}_2} = 0,017 \cdot 45 + 21 \cdot 5 + 2,63(1 - 35) = 3,31 \text{ м}^3/\text{кг};$$

$$\Delta V_{\text{в}} = 0,266(45/3 + 5 - 35/8)(1,4 - 1) = 1,66 \text{ м}^3/\text{кг};$$

$$6,49 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Следовательно, при нормальных условиях продукты горения 1 кг древесины будут состоять из 0,84 м^3 CO_2 , 0,68 м^3 паров H_2O , 3,31 м^3 N_2 и 1,66 м^3 воздуха. Общий объем продуктов горения ($V_{\text{п.г}}$) составит 6,49 $\text{м}^3/\text{кг}$.

4. Находим температуру горения.

Определяем среднее теплосодержание единицы объема продуктов горения:

$$\Delta H_{\text{ср}} = \frac{Q_{\text{п.г}}^T}{V_{\text{п.г}}} = \frac{13\,818,54}{6,49} = 2129,2 \text{ кДж/м}^3.$$

Это значит, что в каждом кубометре продуктов горения при температуре горения будут содержаться 3156,1 кДж тепла. Для дальнейших расчетов необходимо учитывать, что доля азота в продуктах горения наиболее значительна, чем других компонентов горючей смеси.

Определяем процентное содержание азота в продуктах горения. Значения процентного состава азота и кислорода приведены в практической работе 2 (табл. 1.17). Исходя из данных этой таблицы, продукты горения состоят из азота (3,31 %) и кислорода (1,66 %) в составе воздуха. Отсюда определяем долю азота в продуктах горения:

$$\frac{3,31 + 1,66 \cdot 0,79}{6,49} \cdot 100 \% = 71,2 \%,$$

где 0,79 — коэффициент, учитывающий содержание азота в воздухе (см. формулу (1.17)).

При дальнейших расчетах исходим из того, что доля азота в продуктах горения составляет 71,2 %. Поэтому по табл. 20, 21, прил. III (см. размерность энтальпии) находим, при какой температуре удельное теплосодержание азота ΔH_{N_2} соответствует найденной величине $\Delta H_{\text{ср}}$ (2129,2 кДж/м³).

Видим, что эта температура находится между (1400—1500) + 273 К.

Принимая во внимание, что в состав продуктов горения входят также CO₂ и H₂O, которые обладают таким же теплосодержанием ($\Delta H_{\text{ср}} = 2129,2 \text{ кДж/м}^3$), но при более низких температурах (см. табл. 21, прил. III), задаемся температурой (1400 + 273) К. По этой температуре (1673 К) определяем суммарное теплосодержание продуктов горения:

$$\begin{aligned} Q_{\text{п.г}}^{1673\text{K}} &= \sum \Delta H_{\text{п.г}i} V_{\text{п.г}i} = \\ &= 2010 \cdot 3,31 + 2035,5 \cdot 1,66 + 3241,4 \cdot 0,84 + 2560,9 \cdot 0,68 = \\ &= 14\,496,22 \text{ кДж.} \end{aligned}$$

Сравниваем полученные данные, а именно, расчетное значение $Q_{\text{п.г}}^{T_{\text{гор}}}$ (13 818,54 кДж) для 1 кг древесины и $Q_{\text{п.г}}$ при $T = 1673 \text{ К}$ (14 496,22 кДж).

Теплосодержание продуктов горения при $T = 1673$ К выше $Q_{п.г} = 13\,818,54$ кДж, следовательно, $T_r < 1673$ К.

Учитывая, что для $\Delta H_{ср} = 2129,2$ кДж/м³ температура находится между 1300—1400 °С (табл. 21, прил. III), задаем значение $T = (1300 + 273)$ К и вновь определяем теплосодержание продуктов горения аналогично рассмотренным выше расчетам:

$$Q_{п.г}^{1573\text{ К}} = 1861,2 \cdot 3,31 + 1877,5 \cdot 1,66 + 2979,1 \cdot 0,84 + \\ + 2345,5 \cdot 0,68 = 13\,374,61 \text{ кДж.}$$

Теплосодержание продуктов горения при $T = 1573$ К ниже расчетного $Q_{п.г} = 13\,818,54$ кДж, следовательно, $T_r > 1573$ К.

Таким образом, температура горения находится в интервале 2173—2373 К. Точное значение температуры горения находим интерполяцией, считая, что в этом интервале температур теплосодержание продуктов горения линейно зависит от температуры.

При разности температур $(1673 - 1573) = 100$ К, теплосодержание изменится на

$$14\,496,2 - 13\,374,61 = 1121,61 \text{ кДж.}$$

Разность между теплотой горения и теплосодержанием:

$$13\,818,54 - 13\,374,61 = 443,93 \text{ кДж.}$$

Следовательно, истинная T_r будет равна:

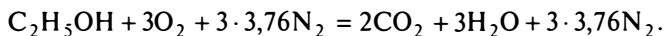
$$T_r = 1573 + \frac{443,93}{1121,61} = 1573,4 \text{ К.}$$

Ответ. Температура горения составляет 1573,4 К.

Пример 2. Определить адиабатическую температуру горения этилового спирта в воздухе.

Решение. Расчет производим по схеме, приведенной в табл. 1.22.

Так как горючее — индивидуальное вещество, для определения объема и состава продуктов сгорания запишем уравнение химической реакции горения:



Следовательно, продукты сгорания состоят из $V_{CO_2} = 2$ моля, $V_{H_2O} = 3$ моля, $V_{N_2} = 11,28$ моля, $V_{п.г} = 16,28$ моля.

1. Низшую теплоту горения определяем по (1.23). Из табл. 9, прил. III находим теплоту образования этанола — 278,2 кДж/моль.

$$Q_{\text{н}} = 2 \cdot 396,9 + 3 \cdot 242,2 - 278,2 = 1242,2 \text{ кДж/моль.}$$

2. Средняя энтальпия продуктов горения

$$H_{\text{ср}} = \frac{1242,2}{16,28} = 76,3 \text{ кДж/моль.}$$

3. Так как $H_{\text{ср}}$ выражена в кДж/моль, по табл. 20, прил. III выбираем, ориентируясь на азот и кислород, первую приближенную температуру горения $T_1 = 2100 \text{ }^\circ\text{C}$.

4. Рассчитываем теплосодержание продуктов горения при $2100 \text{ }^\circ\text{C}$ по (1.88):

$$Q'_{\text{п.г}} = 114,7 \cdot 2 + 93,4 \cdot 3 + 70,4 \cdot 11,28 = 1303,7 \text{ кДж/моль.}$$

5. Сравниваем $Q_{\text{н}}$ и $Q'_{\text{п.г}}$, так как $Q'_{\text{п.г}} > Q_{\text{н}}$, выбираем температуру горения равной $2000 \text{ }^\circ\text{C}$.

6. Рассчитываем теплосодержание продуктов горения при $2000 \text{ }^\circ\text{C}$:

$$Q''_{\text{п.г}} = 108,2 \cdot 2 + 88,16 \cdot 3 + 66,8 \cdot 11,28 = 1235 \text{ кДж/моль.}$$

7. Так как $Q''_{\text{п.г}} < Q_{\text{н}} < Q'_{\text{п.г}}$, определяем температуру горения по (1.89):

$$T_1^0 = 2000 + \frac{(1242,2 - 1235)(2100 - 2000)}{1303,7 - 1235} = 2010 \text{ }^\circ\text{C.}$$

Пример 3. Определить адиабатическую температуру горения органической массы, состоящей из С — 60 %, Н — 7 %, О — 25 %, W — 8 %.

Решение

1. Так как горючее представляет собой сложное вещество, состав продуктов горения рассчитываем по (1.80)—(1.83).

$$V_{\text{CO}_2} = 1,86 \frac{60}{100} = 1,12 \text{ м}^3/\text{кг};$$

$$V_{\text{H}_2\text{O}} = 11,2 \frac{7}{100} + 1,24 \frac{8}{100} = 0,88 \text{ м}^3/\text{кг};$$

$$V_{\text{N}_2} = \frac{1}{100} 7 \cdot 60 + 21 \left(7 - \frac{25}{8} \right) = 5,01 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Общий объем продуктов горения равен:

$$V_{п.г}^0 = 7,01 \text{ м}^3/\text{кг.}$$

2. Определяем низшую теплоту сгорания вещества по формуле Д.И. Менделеева (1.25):

$$Q_H = 339,4 \cdot 60 + 1257 \cdot 7 - 108,9 \cdot 25 - 25,1(9 \cdot 7 + 8) = 24\,658,4 \text{ кДж/кг.}$$

3. Определяем среднюю энтальпию продуктов горения:

$$H_{ср} = \frac{24\,658,4}{7,01} = 3517,6 \text{ кДж/м}^3.$$

4. Так как величина энтальпии рассчитана в кДж/м^3 , первую приближенную температуру выбираем по табл. 21, прил. III. Ориентируясь на азот, принимаем $T_1 = 2300 \text{ }^\circ\text{C}$.

5. Рассчитываем теплосодержание продуктов горения при $2300 \text{ }^\circ\text{C}$ по (1.88):

$$Q'_{п.г} = 5660,7 \cdot 1,12 + 4667,1 \cdot 0,88 + 3469,1 \cdot 5,01 = 27\,827,2 \text{ кДж/кг.}$$

6. Из сравнения Q_H и $Q'_{п.г}$ ($Q_H > Q'_{п.г}$) выбираем вторую приближенную температуру, равную $1900 \text{ }^\circ\text{C}$.

7. Рассчитываем теплосодержание продуктов горения при $1900 \text{ }^\circ\text{C}$:

$$Q''_{п.г} = 4579,7 \cdot 1,12 + 3693,5 \cdot 0,88 + 2818,2 \cdot 5,1 = 22\,498,8 \text{ кДж/кг.}$$

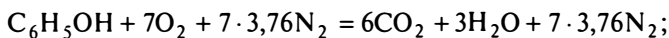
8. Так как $Q''_{п.г} < Q_H < Q'_{п.г}$, определяем температуру горения:

$$T_{г}^0 = 1900 + \frac{(23\,958,4 - 22\,498,8)(2300 - 1900)}{27\,827,2 - 22\,498,8} \approx 2010 \text{ }^\circ\text{C.}$$

Пример 4. Рассчитать действительную температуру горения фенола $\Delta H_{обр} = 4,2 \text{ кДж/моль}$, если потери тепла излучением составили 25 % от Q_H , а коэффициент избытка воздуха при горении равен 2,2.

Решение

1. Определяем состав продуктов горения



$$V_{CO_2} = 6 \text{ моль};$$

$$V_{H_2O} = 3 \text{ моля};$$

$$V_{N_2} = 26,32 \text{ моля};$$

$$\Delta V_B = (7 + 7 \cdot 3,76)(2,2 - 1) = 39,98 \text{ моля.}$$

$$V_{п.г} = 75,3 \text{ моля.}$$

2. Определяем низшую теплоту сгорания фенола (1.23):

$$Q_{\text{н}} = 6 \cdot 396,9 + 3 \cdot 242,2 - 1 \cdot 4,2 = 3103,8 \text{ кДж/моль.}$$

3. Так как по условию задачи 25 % тепла теряется, определяем количество тепла, пошедшее на нагрев продуктов горения (теплосодержание продуктов горения при температуре горения):

$$Q_{\text{п.г}} = Q_{\text{н}} (1 - \eta),$$

где η — доля теплотерь в результате излучения энергии, химического и механического недожога.

$$Q_{\text{п.г}} = 3103,8(1 - 0,25) = 2327,85 \text{ кДж/моль.}$$

4. По (1.90) определяем действительную температуру горения:

$$T_{\text{г}}^{\text{д}} = 273 + \frac{2327,85}{10^{-3}(50,85 \cdot 6 + 39,87 \cdot 3 + 31,81 \cdot 26,32 + 32,26 \cdot 39,98)} = 1185,17 \text{ К.}$$

Ответ. Действительная температура горения равна 1185 К.

Методика определения температуры горения других классов веществ аналогична. В случае горения индивидуальных химических соединений удобнее пользоваться размерностями кмоль/кмоль при определении $V_{\text{п.г}}^{\text{пп}}$ и кДж/кмоль — при нахождении $Q_{\text{п.г}}$ и $\Delta H_{\text{ср}}$. В этом случае в расчете необходимо использовать справочные данные (табл. 20—21, прил. III).

На практике используется calorиметрическая температура горения и температуру пожара. При этом различают температуру внутреннего и наружного пожара.

Температура внутреннего пожара — это средняя температура дыма в помещении, где происходит пожар. **Температура наружного пожара** — это температура пламени.

Содержание работы

Задание 1

Рассчитать calorиметрическую температуру горения керосина следующего состава: С — 86 %; Н — 13,7 %; S — 0,3 %; если теплота его образования $Q = 20,2$ ккал/моль.

Задание 2

Рассчитать теоретическую температуру горения керосина следующего состава: С — 86 %; Н — 13,7 %; S — 0,3 %; если теплота его образования $Q = 20,2$ ккал/моль.

Задание 3

Рассчитать calorиметрическую температуру горения мазута следующего состава: С — 43 %; Н — 13,7 %; S — 0,8 %; если теплота его образования $Q = 18,4$ ккал/моль.

Задание 4

Определить, как изменяется адиабатическая температура горения в гомологическом ряду предельных углеводородов (на примере метана, пропана, пентана и гептана). Построить график зависимости температуры горения от молекулярной массы горючего вещества.

Задание 5

Рассчитать действительную температуру горения газовой смеси, состоящей из 45 % H_2 , 30 % C_3H_8 , 15 % O_2 , 10 % N_2 , если потери тепла составили 30 % Q_H , а коэффициент избытка воздуха при горении равен 1,8.

Задание 6

Рассчитать действительную температуру горения бутано-воздушной смеси стехиометрической концентрации на нижнем концентрационном пределе воспламенения (1,9 %) бутана и 98,1 % воздуха.

Задание 7

Определить количество сгоревшего антрацита (С = 100 %) в помещении объемом 180 м^3 , если среднеобъемная температура возросла с 305 до 625 К.

Методические указания

1. Получите задание и исходные данные для выполнения расчетов.
2. Внимательно изучите в разделе 1.6 основные понятия температуры горения и познакомьтесь с формулами (1.29)—(1.33).
3. Изучите метод последовательных приближений расчета температуры горения по предложенному примеру и формулам (1.87)—(1.91).

4. Изучите последовательность расчета температуры горения согласно табл. 1.22.
5. Изучите метод определения действительной температуры горения по примеру 1 и (1.90)—(1.91).
6. Недостающие для расчетов данные примите из табл. 1.17 (практическая работа 2) и табл. 20—21, прил. III.
7. Познакомьтесь с температурными шкалами (прил. I).

Содержание отчета

Отчет должен отвечать требованиям общих методических указаний по выполнению работ.

В отчете приведите результаты расчетов и ответы на контрольные вопросы.

Контрольные вопросы

1. Дайте определение температуры горения.
2. Как классифицируется температура горения?
3. Укажите различия между calorиметрической, теоретической и действительной температурами горения.

Практическая работа 5

РАСЧЕТ ТЕМПЕРАТУРЫ САМОВОСПЛАМЕНЕНИЯ

Цель работы: научиться рассчитывать температуру самовоспламенения горючего вещества и работать со справочной литературой.

Общие положения

Многие горючие вещества способны к самовоспламенению, т. е. возгоранию без участия источника воспламенения (зажигания). Процесс самовоспламенения может протекать при определенной температуре, характерной для того или иного горючего вещества.

Самая низкая температура вещества, при которой пламенное горение паро-, газообразных продуктов разложения возникает само-

произвольно за счет химической реакции окисления горючего вещества, будет являться температурой самовоспламенения ($T_{\text{св}}$).

Самовоспламенение может быть без распространения пламени. Такое горение является тлением. Тление характерно только для твердых веществ.

Так как самопроизвольное пламенное горение и тление твердых веществ возникает лишь при нагреве до определенных температур — температур самовоспламенения, эти температуры служат одним из важнейших показателей пожароопасности горючих веществ. Для определения этого показателя пожароопасности имеются различные методы расчета $T_{\text{св}}$.

Температура самовоспламенения обозначается $T_{\text{св}}$ и измеряется в град — Цельсия ($^{\circ}\text{C}$) или Кельвина (К).

Определение температуры самовоспламенения горючего вещества, ее зависимость от различных факторов определяются ГОСТ Р 51330.5—99 (МЭК 60079-4—75) «Метод определения температуры самовоспламенения».

Температура самовоспламенения горючего вещества не является постоянной величиной. Она зависит от следующих факторов:

- состава горючей смеси;
- давления (см. табл. 1.5 в разделе 1.8.1);
- наличия катализаторов;
- степени измельчения.

Ознакомимся с температурами самовоспламенения некоторых горючих веществ, приведенными в табл. 1.6 раздела 1.8.1.

Расчет температуры самовоспламенения углеводородов

Температура самовоспламенения $T_{\text{св}}$ в гомологическом ряду соединений снижается с увеличением длины углеродной цепи.

Методика определения $T_{\text{св}}$ сводится к следующему:

1. Определение средней длины углеродной цепи в молекуле соединения данного класса.

Расчетная формула условной средней длины цепи имеет вид:

$$l_{\text{ср}} = \frac{\sum_{i=1}^n n_i l_i}{\sum n_i}, \quad (1.92)$$

где n_i — число цепей;

l_i — длина i -й углеродной цепи.

2. Определение общих чисел цепей по формуле

$$\sum n_i = \frac{M(M-1)}{2}, \quad (1.93)$$

где M — число концевых групп в молекуле — метильных групп CH_3 ; ароматических (фенильных) групп C_6H_5 , гидроксильных групп OH и других функциональных групп.

При определении l_i надо иметь в виду, что группа $-\text{OH}$ удлиняет цепь, а фенильная группа уменьшает ее на один атом углерода. Температуру самовоспламенения можно также рассчитать по формулам:

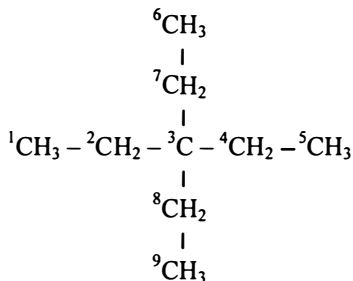
$$T_{\text{св}} = 300 + 116 \sqrt{5 - l_{\text{ср}}} \quad \text{при } l_{\text{ср}} \leq 5; \quad (1.94)$$

$$T_{\text{св}} = 300 + 38 \sqrt{l_{\text{ср}} - 5} \quad \text{при } l_{\text{ср}} > 5. \quad (1.95)$$

Пример 1. Рассчитать $T_{\text{св}}$ 3,3-диэтиленпентана.

Решение

1. Записываем структурную формулу:



2. Нумеруем все атомы углерода в молекуле от 1 до 9.

3. Находим общее число одинаковых цепей с концевой метильной группой: $\text{CH}_3 - \text{CH}_2 -$. Таких цепей четыре.

4. Производим расчет общих чисел цепей по (1.93).

$$\sum n_i = M(M-1) / 2 = 4(4-1) / 2 = 6.$$

5. Находим состав цепей с одинаковым числом атомов углерода — C_5 . Их шесть: 1—2—3—4—5; 1—2—3—8—9; 1—2—3—7—6; 5—4—3—8—9; 5—4—3—7—6—; 6—7—3—8—9. Видим, что в данном соединении длина всех цепей одинакова.

6. Находим среднюю длину цепи по (1.92):

$$l_{\text{cp}} = \frac{\sum_{i=1}^n n_i l_i}{\sum n_i} = \frac{6 \cdot 5}{6} = 5,$$

где $\sum n_i = 6$ согласно пункту 4; $c_i = 5$, так как длина одинаковых цепей состоит из пяти атомов углерода.

7. По табл. 22—24, прил. III для предельных углеводородов находим по средней длине цепи температуру самовоспламенения. Она равна: $T_{\text{св}} = 560$ К.

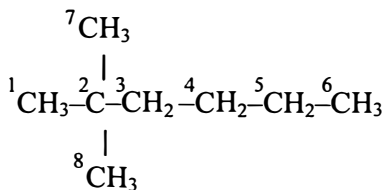
Для самопроверки можно сравнить справочное значение температуры самовоспламенения с экспериментальной величиной и оценить ошибку расчетного метода.

Ответ. $T_{\text{св}}$ 3,3-диэтиленпентана равна 560 К.

Пример 2. Рассчитать температуру самовоспламенения 2,2-диметилгексана.

Решение

1. Записываем структурную формулу горючего вещества и определяем количество цепей:



$M_p = 4$, так как в молекуле содержатся четыре группы —CH_3 :

$$\sum n_i = \frac{4(4-1)}{2} = 6.$$

2. Находим длину каждой из шести цепей и среднюю длину молекулы:

n_i	1—6	7—6	8—6	1—7	1—8	7—8
l_i	6	6	6	3	3	3

$$l_{\text{cp}} = \frac{3 \cdot 6 + 3 \cdot 3}{6} = 4,5.$$

По табл. 22, прил. III определяем температуру самовоспламенения при средней длине цепи, она равна 643 К.

3. Производим пересчет по формуле (1.94):

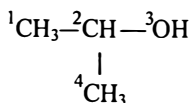
$$T_{\text{св}} = 300 + 116 \sqrt{5 - 4,5} = 382^\circ \text{ или } 655 \text{ К.}$$

Ответ. Температура самовоспламенения 2,2-диметилгексана 655 К.

Пример 3. Рассчитать температуру самовоспламенения изопропилового спирта.

Решение

1. Исходя из структурной формулы вещества определяем количество цепей:



$M_p = 3$, так как в молекуле содержится две группы $-\text{CH}_3$ и одна группа $-\text{OH}$.

$$M_{\text{ц}} = \frac{3(3-1)}{2} = 3.$$

2. Находим длину каждой цепи и ее среднюю длину:

n_i	1—3	3—4	1—4
l_i	2 + 1	2 + 1	3

В цепях 1—3 и 3—4 содержится по два атома углерода и одна группа OH , которая удлиняет цепь на один атом углерода:

$$l_{\text{ср}} = \frac{3 \cdot 3}{3} = 3.$$

3. По табл. 23, прил. III определяем температуру самовоспламенения изопропилового спирта (при средней длине цепи), она равна 706 К.

4. По (1.94) рассчитываем температуру самовоспламенения:

$$T_{\text{св}} = 300 + 116 \sqrt{5 - 3} = 464^\circ \text{С или } 737 \text{ К.}$$

Согласно справочным данным температура самовоспламенения изопропилового спирта равна 693 К.

Относительная ошибка расчета с использованием табл. 23, прил. III составляет:

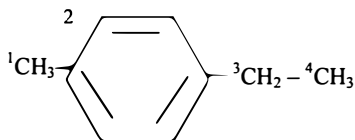
$$\Delta = \frac{706 - 693}{693} 100 = 1,9 \%$$

Ответ. Температура самовоспламенения изопропилового спирта 737 К.

Пример 4. Определить температуру самовоспламенения ароматического вещества 1-метил-4-этилбензола.

Решение

1. Структурная формула вещества:



$M_p = 3$, так как в молекуле содержится две метильные и одна группа фенильная группы.

2. Определяем длину цепей:

n_i	1—4	1—2	2—4
l_i	3—1	1—1	2—1

Длина цепи уменьшается на один атом углерода, так как в нее входит фенильная группа:

$$l_{\text{ср}} = \frac{1 \cdot 2 + 1 \cdot 0 + 1 \cdot 1}{3} = 1.$$

3. По табл. 24, прил. III определяем, что температура самовоспламенения равна 712 К.

Ответ. Температура самовоспламенения 1-метил-4-этилбензола 712 К.

Расчет температуры самовоспламенения твердых материалов

Температура самовоспламенения ($T_{\text{св}}$) твердых материалов определяют в термостате, где образец выдерживают длительное время при заданной температуре. За температуру $T_{\text{св}}$ принимается минимальная температура термостата (окружающей среды) t , при которой наблюда-

ется резкое повышение температуры материала, заканчивающееся тлением или горением. Для вычисления $T_{св}$ и времени нагрева твердого материала используется следующая экспериментально выявленная зависимость между температурой окружающей среды (термоста-та), массой вещества и временем нагревания до момента его самовоспламенения:

$$\lg t = A_p + n_p \lg S; \quad (1.96)$$

$$\lg t = A_b - n_b \lg \tau, \quad (1.97)$$

где: t — температура окружающей среды, °С;

A_p, A_b, n_p, n_b — константы из экспериментального опыта, зависят от давления среды и времени сжигания (табл. 1.24);

S — удельная поверхность образца, м²;

τ — время нагревания образца, ч.

Пример 5. Определить температуру самовоспламенения $T_{св}$ и время нагрева кипы сена размером $0,8 \times 0,8 \times 0,8$ м.

Решение

1. Определяем удельную поверхность сена в кипе:

$$S = \frac{F}{V} = \frac{6 \cdot 0,8^2}{0,8^3} = 7,5 \text{ м}^{-1}.$$

2. Определяем температуру нагрева по (1.97), (компоненты A_p, n_p приведены в табл. 1.24).

$$\lg t = 2,103 + 0,109 \lg 7,5 = 2,198; \quad t = 158 \text{ °С}.$$

Таблица 1.24. Константы для некоторых твердых горючих материалов*

Наименование материала	Константы			
	A_p	A_b	n_p	n_b
Опилки сосновые	1,855	2,296	0,219	0,096
Плита торфяная	1,760	2,271	0,248	0,017
Сено	2,103	2,311	0,109	0,058
Солома пшеничная	2,185	2,301	0,067	0,035
Хлопок	2,018	2,332	0,140	0,057

* Данные из справочника «Пожарная опасность веществ и материалов». М.: Химия, 1970.

3. Определяем время нагрева кипы сена по (1.97) (компоненты A_B , n_B приведены в табл. 1.24):

$$\lg 158 = 2,311 - 0,058 \lg \tau; \quad \tau = 87,4 \text{ ч.}$$

Ответ. Температура самовоспламенения $T_{\text{св}} = 158 \text{ }^\circ\text{C}$. Для нагрева кипы сена потребуются 87,4 ч.

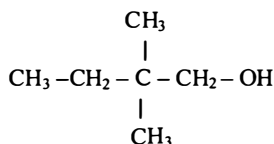
Содержание работы

Задание 1

Рассчитать температуру самовоспламенения тюков хлопка размером $0,5 \times 0,5 \times 0,5$ м и размером $1,5 \times 1,5 \times 1,5$ м.

Задание 2

Рассчитать температуру самовоспламенения органического вещества 2,2-диметил-бутана-1 формулы:

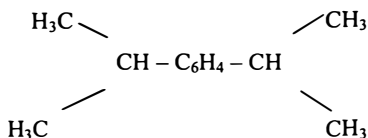


Задание 3

Определить температуру самовоспламенения торфяных плит размером $0,3 \times 0,3 \times 0,3$ м и размером $0,7 \times 0,7 \times 0,7$ м.

Задание 4

Рассчитать температуру самовоспламенения 1,4-диизопропил-бензола формулы:



Задание 5

Рассчитать температуру самовоспламенения нормального бутилового спирта, вторичного бутилового спирта и третичного бутилового спирта. Сделать вывод о влиянии разветвления углеродной цепи на температуру самовоспламенения.

Задание 6

Определить температуру самовоспламенения этана, бутана, гексана, декана. Построить график зависимости температуры самовоспламенения от положения веществ в гомологическом ряду.

Задание 7

Рассчитать температуру самовоспламенения веществ: толуола, 1,4-диизопропилбензола и сделать вывод о влиянии боковой цепи на сравнительную пожарную опасность ароматических соединений.

Задание 8

Рассчитать температуру самовоспламенения октана, октанола-1 и этилбензола. Сделать вывод о влиянии строения вещества на их сравнительную пожарную опасность.

Методические указания

1. Получите задание и исходные данные для выполнения расчета.
2. Изучите в разделах 1.6—1.8 основные понятия процесса горения, понятие температуры самовоспламенения, $T_{\text{св}}$.
3. Ознакомьтесь с методикой расчета температуры самовоспламенения. Внимательно изучите необходимые для расчета формулы (1.92)—(1.97).
4. Недостающие для расчетов данные выберите из табл. 22—24, прил. III.
5. Познакомьтесь с температурными шкалами (прил. I).
6. Произведите расчеты по заданию преподавателя и оформите отчет.

Содержание отчета

Отчет должен отвечать требованиям общих методических указаний по выполнению работ.

В отчете приведите результаты расчетов и ответы на контрольные вопросы.

Контрольные вопросы

1. Дайте определение температуры самовоспламенения.
2. Какие факторы оказывают влияние на температуру самовоспламенения?

3. Как рассчитать $T_{\text{св}}$ твердых материалов и индивидуальных горючих веществ?
4. Обоснуйте влияние длины цепи горючего вещества на $T_{\text{св}}$.
5. Как влияет структура вещества на его температуру самовоспламенения?

Практическая работа 6

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КРИТИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ САМОВОСПЛАМЕНЕНИЯ ГОРЮЧИХ ВЕЩЕСТВ

Цель работы: научиться рассчитывать температурные и концентрационные пределы воспламенения.

Общие положения

Нижний (верхний) концентрационный предел распространения пламени — это минимальная (максимальная) концентрация горючего в окислителе, способная воспламениться от высокоэнергетического источника с последующим распространением горения на всю смесь.

В качестве показателей взрываемости горючих и легковоспламеняющихся жидкостей принята температура вспышки, представляющая собой нижний концентрационный предел взрываемости. Характеристика концентрационных пределов воспламенения (взрываемости) дана в разделе 1.10.

Концентрационные пределы выражаются в % по объему — $\varphi_{\text{н(в)}}$ или г/м^3 — $c_{\text{н(в)}}$.

Концентрационные пределы воспламенения зависят от следующих факторов:

- температуры смеси;
- давления смеси;
- объема и диаметра сосуда (см. раздел 1.10.1).

Температурные пределы воспламенения представлены **нижним температурным пределом воспламенения (НТПВ)** и **верхним температурным пределом воспламенения (ВТПВ)**.

Способы определения концентрационных пределов воспламенения газозвудушных смесей

Известны два способа определения концентрационных пределов воспламенения: аналитический (расчетный) и экспериментальный. Рассмотрим аналитический способ определения концентрационных пределов воспламенения индивидуальных веществ и смесей.

Расчет концентрационных пределов воспламенения индивидуальных горючих веществ

Концентрационные пределы воспламенения $\varphi_{н(в)}$ индивидуальных горючих органических веществ в первом приближении можно вычислить по формуле:

$$\varphi_{н(в)} = \frac{100}{a \cdot n + b}, \quad (1.98)$$

где n — число атомов кислорода, необходимое для полного сгорания одной молекулы вещества; n — определяют по уравнению химической реакции стехиометрический коэффициент при кислороде;

a и b — эмпирические константы.

Значения a и b приведены ниже:

Параметры	Константы	
	a	b
Нижний предел C_n	4,342	4,679
Верхний предел C_v :		
при $n \leq 15$	0,775	0,560
при $n > 15$	0,384	6,554

Величину n определяют по формуле

$$n = 2(n_C + n_S) + \frac{n_H - n_X}{2} - n_0, \quad (1.99)$$

где n_C , n_S , n_O , n_X — количество в молекуле вещества атомов углерода, серы, водорода, кислорода и галогенов, окисляющих водород до галогеноводорода, а углерод — до галогенуглерода.

Пример 1. Вычислить нижний концентрационный предел воспламенения метана.

Решение

1. Находим число атомов кислорода, необходимое для полного сгорания одной молекулы метана по (1.99):

$$n = 2 \cdot 1 + \frac{4}{2} = 4.$$

2. Выбираем значения постоянных a и b . Значения постоянных следующие:

$$a = 4,342; \quad b = 4,679.$$

3. Находим нижний концентрационный предел воспламенения метана по (1.98):

$$\varphi_n = \frac{100}{4,342 \cdot 4 + 4,679} = 4,5 \text{ \% об.}$$

Ответ. НКПВ метана составляет 4,5 % об.

Расчет концентрационных пределов воспламенения смеси горючих веществ

Для вычисления нижнего и верхнего концентрационных пределов воспламенения смеси нескольких паров или газов применима **формула Ле-Шателье**, выражающая правило смешения. В основу формулы положено предположение, что несколько смесей, находящихся на нижнем пределе воспламенения, при смешении образуют смесь, также находящуюся на нижнем пределе воспламенения (% об.):

$$\varphi_n = \frac{100}{\frac{\varphi_1}{\varphi_{n_1}} + \frac{\varphi_2}{\varphi_{n_2}} + \dots + \frac{\varphi_n}{\varphi_{n_n}}}, \quad (1.100)$$

где $\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_n$ — концентрация горючих компонентов, % об.;

$\varphi_{n_1}, \varphi_{n_2}, \varphi_{n_n}$ — соответствующий предел воспламенения 1-го, 2-го, n -го компонентов в смеси, % об.

Формула Ле-Шателье (1.100) справедлива для подавляющего большинства смесей веществ, не вступающих в химическую реакцию. При наличии в смеси флегматизирующих добавок вводятся поправочные коэффициенты.

Пример 2. Вычислить нижний концентрационный предел воспламенения смеси пропана и бутана, если пропана 80 % об., бутана 20 % об.

Решение

По табл. 11, прил. III находим нижние пределы воспламенения пропана ($\varphi_{н_1}$) и бутана ($\varphi_{н_2}$): $\varphi_{н_1} = 2,1$ % об.; $\varphi_{н_2} = 1,8$ % об. Подставляем найденные величины в формулу Ле-Шателье (1.100):

$$\varphi_{н} = \frac{100}{\frac{80}{2,1} + \frac{20}{1,8}} = 2 \text{ \% об.}$$

Ответ. НКПВ смеси пропана с бутаном составляет 2 %.

Расчет пределов распространения пламени по теплоте горения

Нижний концентрационный предел воспламенения $\varphi_{н}$ определяют по предельной теплоте сгорания. Установлено, что 1 м³ различных газозвудушных смесей на НКПВ выделяет при горении постоянное среднее количество теплоты — 1830 кДж, называемое предельной теплотой горения. Следовательно,

$$\varphi_{н} = \frac{Q_{пр} \cdot 100}{Q_{н}}. \quad (1.101)$$

Если принять среднее значение $Q_{пр}$ равным 1830 кДж/м³, то $\varphi_{н}$ согласно (1.101) будет равно:

$$\varphi_{н} = \frac{1830 \cdot 100}{Q_{н}}, \quad (1.102)$$

где $Q_{н}$ — низшая теплота горения горючего вещества, кДж/м³.

Пример 3. По предельной теплоте сгорания определить нижний концентрационный предел воспламенения бутана в воздухе.

Решение

Для расчета по (1.102) в табл. 9, прил. III находим низшую теплоту сгорания вещества 2882,3 кДж/моль. Эту величину необходимо перевести в другую размерность — кДж/м³:

$$\frac{2882,3 \cdot 1000}{22,4} = 128,7 \cdot 10^3 \text{ кДж/м}^3.$$

По (1.102) определяем нижний концентрационный предел воспламенения (НКПВ):

$$\varphi_{\text{н}} = \frac{1830 \cdot 100}{128,7 \cdot 10^3} = 1,42 \% \text{ об.}$$

По табл. 12, прил. III находим, что экспериментальное значение $\varphi_{\text{н}} = 1,9 \%$. Относительная ошибка расчета, следовательно, составила

$$\Delta_{\text{н}} = \frac{1,9 - 1,42}{1,9} \cdot 100 \approx 25 \%.$$

Ответ. НКПВ бутана в воздухе составляет 1,42 % об.

Расчет температурных пределов воспламенения горючих веществ

Температурные пределы воспламенения нефтепродуктов используются для оценки пожароопасности горючих веществ. Эти пределы можно рассчитать по следующим эмпирическим формулам (при нормальном атмосферном давлении 760 мм рт. ст.):

$$T_{\text{нтпв}} = 0,82 t_{\text{к}} - 86; \quad (1.103)$$

$$T_{\text{втпв}} = 0,70 t_{\text{к}} - 42, \quad (1.104)$$

где $t_{\text{к}}$ — температура кипения жидкости.

Для жидкостей температура вспышки ($T_{\text{всп}}$) является определяющим параметром для определения пожароопасности горючих жидкостей. В зависимости от $T_{\text{всп}}$ жидкости подразделяют на:

- ЛВЖ (легко воспламеняющиеся жидкости) — если $T_{\text{всп}} < 45 \text{ }^\circ\text{C}$ (например, серный эфир, ацетон);
- ГЖ (горючие жидкости) — если $T_{\text{всп}} > 45 \text{ }^\circ\text{C}$ (например, глицерин, растительные масла и др.).

Расчет пределов воспламенения паров жидкостей и твердых веществ

Концентрационные пределы воспламенения паров жидких и твердых веществ могут быть рассчитаны по формуле

$$\varphi_{\text{н(в)}} = \frac{p_{\text{н(в)}}}{p_{\text{о}}} \cdot 100, \% \text{ об.}, \quad (1.105)$$

где $p_{н(в)}$ — давление насыщенного пара вещества при температуре, соответствующей нижнему (верхнему) пределу воспламенения, Па;

p_0 — давление окружающей среды, Па.

Давление насыщенного пара может быть определено по уравнению Антуана (1.44) или по табл. 14, прил. III:

$$\lg p = A - \frac{B}{C + t},$$

где A, B, C — константы Антуана, приведены в табл. 10, прил. III;

t — температура, °С (температурные пределы).

Пример 4. Определить концентрационные пределы воспламенения насыщенных паров метанола в воздухе, если известно, что его температурные пределы составляют 280—312 К. Атмосферное давление нормальное (см. прил. II).

Решение

1. Для расчета по (1.105) необходимо определить давление насыщенных паров, соответствующее нижнему (7 °С) и верхнему (39 °С) пределам воспламенения.

2. По уравнению Антуана (1.44) находим давление насыщенного пара, воспользовавшись данными табл. 10, прил. III:

$$\lg p_n = 8,22777 - \frac{1660,454}{245,818 + 7} = 1,65999;$$

$$p_n = 45,7 \text{ мм рт. ст.} = 45,7 \cdot 133,32 = 6092,8 \text{ Па};$$

$$\lg p_v = 8,22777 - \frac{1660,454}{245,818 + 39} = 2,39789;$$

$$p_v = 250 \text{ мм рт. ст.} = 250 \cdot 133,32 = 33\,300 \text{ Па.}$$

3. По (1.105) определяем НКПВ и ВКПВ:

$$\varphi_n = \frac{6092,8 \cdot 100}{101325} = 6 \% \text{ об.};$$

$$\varphi_v = \frac{33\,300 \cdot 100}{101\,325} = 32,9 \% \text{ об.}$$

Ответ. НКПВ паров метанола в воздухе составляет $\varphi_n = 6 \% \text{ об.}$, ВКПВ — $\varphi_v = 32,9 \% \text{ об.}$

Расчет концентрационных пределов воспламенения при различных температурах

Расчет концентрированных пределов воспламенения при различных температурах вычисляют по формулам:

$$\varphi_{н(T_2)} = \varphi_{н(T_1)} \cdot \left(1 - \frac{T_2 - T_1}{T_r - T_1} \right); \quad (1.106)$$

$$\varphi_{в(T_2)} = \varphi_{в(T_1)} \cdot \left(1 + \frac{T_2 - T_1}{T_r - T_1} \right), \quad (1.107)$$

где $\varphi_{н(T_1)}$, $\varphi_{н(T_2)}$ — нижний концентрационный предел воспламенения при температурах T_1 и T_2 (НКПВ), % об.;

$\varphi_{в(T_1)}$, $\varphi_{в(T_2)}$ — верхний концентрационный предел воспламенения при температурах T_1 и T_2 (ВКПВ), % об.;

T_r — температура горения горючей смеси.

Для определения НКПВ температуру горения принимают приблизительно равной 1550 К; при определении ВКПВ — 1100 К.

При разбавлении газозвушной смеси инертными газами (N_2 , CO_2 , H_2O (пары)) область воспламенения сужается: верхний предел снижается, а нижний — возрастает.

Концентрация инертного газа (флегматизатора), при которой верхний и нижний пределы воспламенения смыкаются, называется **минимальной флегматизирующей концентрацией**, φ_{ϕ} . Содержание кислорода в такой системе называется **минимальным взрывоопасным содержанием кислорода (МВСК)**.

Содержание кислорода ниже МВСК называется **безопасным** и обозначается $\varphi_{O_2 \text{ без}}$.

Расчет минимальной флегматизирующей концентрации и содержания кислорода: минимального взрывоопасного и безопасного, осуществляют по формуле, % об.:

$$\varphi_{\phi} = \frac{h'_i \cdot \Delta H_f^0 + h'_{\phi} + \sum h'_i \cdot m_i}{h''_{\phi} - 1 + \sum h''_i \cdot m_i}; \quad (1.108)$$

$$\varphi_{O_2} = \frac{100 - \varphi_{\phi}}{4,844}; \quad (1.109)$$

$$\varphi_{O_2 \text{ без}} = 1,2 \varphi_{O_2} - 4,2, \quad (1.110)$$

где ΔH_f^0 — стандартная теплота образования горючего, Дж/моль;

h'_i, h''_i, h''_ϕ — константы, зависящие от вида химического элемента в молекулы горючего и вида флегматизатора (табл. 25, прил. III);

m_i — количество атомов i -го элемента (структурной группы) в молекуле горючего.

Пример 5. Каково минимальное количество диэтилового эфира, в кг, способное при испарении в емкости объемом 350 м^3 создать взрывоопасную концентрацию?

Решение

1. Концентрация будет взрывоопасной, если $\varphi_n = \varphi_{п.г}$, где ($\varphi_{п.г}$ — концентрация паров горючего вещества). По табл. 13, прил. III находим НКПВ диэтилового эфира. Он равен 1,7 % об.

2. Определяем объем паров диэтилового эфира, необходимый для создания в объеме 350 м^3 этой концентрации

$$V_{п.г} = \frac{1,7 \cdot 350}{100} = 5,95 \text{ м}^3.$$

Таким образом, для создания НКПВ диэтилового эфира в объеме 350 м^3 необходимо ввести $5,95 \text{ м}^3$ его паров.

3. Принимаем во внимание, что 1 кмоль (74 кг) пара, приведенный к нормальным условиям, занимает объем, равный $22,4 \text{ м}^3$, найдем количество диэтилового эфира:

$$M_{г} = \frac{74 \cdot 5,95}{22,4} = 19,7 \text{ кг}.$$

Ответ. Минимальное количество диэтилового эфира, способное при испарении в емкости создать взрывоопасную концентрацию, составляет 19,7 кг.

Пример 6. Определить, возможно ли образование взрывоопасной концентрации в объеме 50 м^3 при испарении 1 кг гексана, если температура окружающей среды 300 К.

Решение

Очевидно, паровоздушная смесь будет взрывоопасной, если $\varphi_n \leq \varphi_{пг} \leq \varphi_v$.

1. Определяем объем паровой фазы гексана, принимая во внимание, что при испарении 1 кмоль (86 кг) гексана при 273 К объем паровой фазы будет равен $22,4 \text{ м}^3$. При 300 К объем паров гексана, образующихся в результате испарения 5 кг вещества, будет равен:

$$V_{пг} = \frac{5 \cdot 22,4 \cdot 300}{86 \cdot 273} = 1,43 \text{ м}^3.$$

2. Концентрация паров гексана в помещении объемом 50 м^3 , следовательно, будет равна:

$$\varphi_{\text{п.г}} = \frac{1,43}{50} \cdot 100 = 2,86 \% \text{ об.}$$

Ответ. Определив нижний и верхний пределы воспламенения гексана в воздухе, по табл. 11, прил. III устанавливаем, что смесь является взрывоопасной.

Пример 7. Рассчитать безопасную концентрацию кислорода при разбавлении углекислым газом смеси паров ацетона в воздухе.

Решение

По табл. 9, прил. III находим теплоту образования ацетона $248,1 \cdot 10^3 \text{ Дж/моль}$. Из химической формулы ацетона ($\text{C}_3\text{H}_6\text{O}$) следует, что $m_{\text{C}} = 3$, $m_{\text{H}} = 6$, $m_{\text{O}} = 1$. Значения остальных параметров, необходимых для расчета по (1.108), выбираем из табл. 25, прил. III для диоксида углерода:

$$\begin{aligned} \varphi_{\text{Ф}} &= \frac{0,735 \cdot 10^{-5} \cdot 248 \cdot 10^3 + 0,579 + 1,251 \cdot 3 + 0,418 \cdot 6 + 0,542 \cdot 1}{2,020 - 1 + 4,642 \cdot 3 + 1,160 \cdot 6 - 2,321 \cdot 1} \cdot 100 = \\ &= 47 \% \text{ об.}; \end{aligned}$$

$$\varphi_{\text{O}_2} = \frac{100 - 47}{4,844} = 10,9 \% \text{ об.}; \quad \varphi_{\text{O}_2 \text{ без}} = 1,2 \cdot 10,7 - 4,2 = 8,6 \% \text{ об.}$$

Следовательно, при снижении концентрации кислорода до 8,6 % в четырехкомпонентной системе, состоящей из паров ацетона, диоксида углерода, азота и кислорода, смесь становится взрывоопасной. При содержании же кислорода, равном 10,9 %, эта смесь будет предельной по взрываемости. Согласно справочным данным (справочник «Пожарная опасность веществ и материалов, применяемых в химической промышленности». М.: Химия, 1979) МВСК ацетонвоздушной смеси при разбавлении ее диоксидом углерода составляет 14,9 %. Определяем относительную ошибку расчета:

$$\Delta = \frac{10,9 - 14,9}{14,9} = -26,8 \%.$$

Таким образом, результаты расчета МВСК занижены на 26,8 %.

Ответ. Безопасная концентрация кислорода при разбавлении углекислым газом смеси паров ацетона в воздухе составляет $8,6 + 2,4 = 11 \% \text{ об.}$

Расчет температурных пределов воспламенения

Пример 8. Определить температурный предел воспламенения (ТПВ) метилового спирта, если температура его кипения равна $65\text{ }^\circ\text{C}$.

Решение

1. Для расчета температурных пределов воспламенения (распространения пламени) изучаем подраздел 1.10.3 и выбираем необходимую формулу. Значения констант определяем по табл. 15, прил. III для нормальных жирных спиртов

$$t_{\text{н}} = 0,5746 \cdot 65 - 33,7 = 3,6\text{ }^\circ\text{C} = 276,6\text{ K};$$

$$t_{\text{в}} = 0,6928 \cdot 65 - 15,0 = 30\text{ }^\circ\text{C} = 303\text{ K}.$$

2. Определяем относительную ошибку расчета. По табл. 13, прил. III находим, что ТПВ метилового спирта составляют $280\text{--}312\text{ K}$:

$$\Delta_{\text{н}} = \frac{276,6 - 280}{280} 100 = -1,2\text{ }%; \quad \Delta_{\text{в}} = \frac{303 - 312}{312} 100 = -2,9\text{ }%.$$

Следовательно, результаты расчета занижены менее чем на 3 %.

Пример 9. Определить температурные пределы воспламенения ацетона, если его концентрационные пределы в воздухе равны $2,2\text{--}13,0\text{ }%$. Атмосферное давление — нормальное.

Решение

1. По (1.43) (подраздел 1.10.3) определяем давление насыщенного пара ацетона, соответствующее нижнему и верхнему температурным пределам воспламенения:

$$p_{\text{н}} = \frac{2,2 \cdot 101325}{100} = 2230\text{ Па}; \quad p_{\text{в}} = \frac{13,0 \cdot 101325}{100} = 13172\text{ Па};$$

$$p_{\text{н}} = \frac{2230}{133,32} = 16,73\text{ мм рт. ст.}; \quad p_{\text{в}} = \frac{13172}{133,32} = 98,8\text{ мм рт. ст.}$$

2. Из уравнения Антуана (1.44) следует:

$$t = \frac{B}{A - \lg p} - C.$$

Для этого из табл. 10, прил. III находим значения констант A , B и C для ацетона:

$$A = 7,25058; \quad B = 1281,721; \quad C = 237,088.$$

Отсюда

$$\lg p_{\text{н}} = 1,2235; \lg p_{\text{в}} = 1,9994;$$

$$t_{\text{н}} = \frac{1281,721}{7,5058 - 1,2235} - 237,88 = -33 \text{ }^{\circ}\text{C} = 240 \text{ K};$$

$$t_{\text{в}} = \frac{1281,721}{7,25058 - 1,9994} - 237,088 = 7 \text{ }^{\circ}\text{C} = 280 \text{ K}.$$

Для решения этого примера можно воспользоваться данными табл. 14, прил. III. Из табличных данных следует, что НТПВ паров ацетона при $p_{\text{н}}$ (находящемся в интервале давлений насыщенных паров 26,66—13,33 кПа) находится между температурами 241,9—252,2 К, а ВТПВ при $P_{\text{в}}$ (интервал давлений 133,32—79,99 кПа) — между 271,0 и 280,7 К.

Линейной интерполяцией определяем ТПВ по формуле

$$t_{\text{н}} = t_1 + \frac{(p_{\text{н}} - p_1)(t_2 - t_1)}{p_2 - p_1};$$

$$t_{\text{н}} = 241,79 + \frac{(22,3 - 13,33)(252,2 - 241,9)}{26,66 - 13,33} = 248,8 \text{ K};$$

$$t_{\text{в}} = 271 + \frac{(131,7 - 79,99)(280,7 - 271)}{133,32 - 79,99} = 280,4 \text{ K}.$$

Ответ. Температурные пределы воспламенения ацетона составляют 248,8 и 280,4 К.

Содержание работы

Задание 1

Вычислить НКПВ и ВКПВ этана, бутана, гексана. Сравнить их пожаровзрывоопасность.

Задание 2

Вычислить концентрационные пределы воспламенения метана, этилена, ацетилен. Сделайте вывод об их пожаровзрывоопасности.

Задание 3

Определить концентрационные пределы воспламенения этилена в воздухе.

Задание 4

Вычислить НКПВ и ВКПВ уксусной кислоты, уксусного альдегида и проанализировать возможность образования взрывоопасной концентрации.

Задание 5

Определить концентрационные пределы воспламенения газовой смеси, состоящей из 50 % бутана, 10 % пропилена и 40 % этилена.

Задание 6

Вычислить НКПВ смеси этана и пропана, если этана — 78 %, пропана — 22 %.

Задание 7

Вычислить НКПВ смеси пропана и бутана, если пропана — 90 %, бутана — 10 %.

Задание 8

Вычислить НТПВ и ВТПВ нефтяной фракции с температурой выкипания 64 °С.

Под температурой выкипания смеси понимают температуру кипения наиболее высококипящего компонента.

Задание 9

По предельной теплоте сгорания определить, как изменится нижний концентрационный предел воспламенения в воздухе от положения предельных углеводородов (этан, пропан, бутан, гептан, гексан) в гомологическом ряду. Построить график зависимости НКПВ от молярной массы горючего.

Задание 10

Определить концентрационные пределы воспламенения сероуглерода при атмосферном давлении, равном 99 000 Па, если его температурные пределы составляют 223—299 К.

Задание 11

Определить концентрационные пределы воспламенения парогазовой смеси, состоящей из 20 % этана, 60 % этилена, 20 % паров этилового спирта.

Задание 12

Определить, возможно ли образование взрывоопасной концентрации при температуре 298 К над поверхностью жидкой фазы, со-

стоящей из 25 % уксусно-метилового эфира, 40 % уксусного альдегида, 35 % амилового спирта.

Задание 13

Определить температурные пределы воспламенения в гомологическом ряду жирных углеводородов: бутана, пентана, гексана, октана, температуры кипения которых соответственно равны 273,5; 309; 341,7; 398,7 К. Построить график изменения ТПВ от положения горючего в гомологическом ряду.

Задание 14

Сравнить температурные пределы воспламенения н-бутиловых эфиров муравьиной и уксусной кислот. На основании полученных данных сделать вывод об их сравнительной пожарной опасности. Температура кипения бутилформиата равна 379,8 К, а бутилацетата — 399 К.

Задание 15

Сравнить температурные пределы воспламенения спиртов: метилового, этилового, изобутилового, н-бутилового и сделать вывод об их сравнительной пожарной опасности. Температура кипения метилового спирта 64,7; этилового — 78,4; н-бутилового — 117,7; изобутилового — 82,8 °С.

Методические указания

1. Получите задание и исходные данные для выполнения расчета.
2. Изучите критические условия самовоспламенения горючих веществ (раздел 1.10.2).
3. Ознакомьтесь с методом расчета концентрационных пределов воспламенения по формуле Ле-Шателье (1.100).
4. Проанализируйте формулы (1.43)—(1.44) и (1.98)—(1.110), используемые для расчета критических условий воспламенения.
5. Ознакомьтесь со справочными данными, представленными в табл. 9, 11—14, прил. III.

Содержание отчета

Отчет должен отвечать требованиям общих методических указаний по выполнению работ. В отчете приведите результаты расчетов и ответы на контрольные вопросы.

Контрольные вопросы

1. Дайте определение НКПВ, ВКПВ.
2. Дайте определение НТПВ, ВТПВ.
3. Что понимается под концентрационными и температурными пределами воспламенения? Обоснуйте ответ.
4. Как рассчитывают ВКПВ и НКПВ индивидуальных веществ и горючих смесей?
5. Дайте определение температуры вспышки. Проанализируйте используемые методы расчета температуры вспышки по (1.34)—(1.40).
6. Дайте определение температуры воспламенения. Проанализируйте используемые методы расчета температуры воспламенения по (1.41)—(1.42).
7. Как используют температуру вспышки для определения пожароопасности горючих веществ?
8. Как рассчитывают концентрационные пределы воспламенения паров жидких и твердых веществ?

Практическая работа 7

РАСЧЕТ ТЕМПЕРАТУРЫ ВСПЫШКИ И ВОСПЛАМЕНЕНИЯ

Цель работы: научиться рассчитывать температуру вспышки и воспламенения горючих веществ.

Общие положения

Температурой вспышки называется наименьшая температура жидкости, при которой она, испаряясь, образует концентрацию паров в смеси с воздухом, способную дать вспышку при наличии источника зажигания.

При этой температуре устойчивого горения жидкости не возникает, так как скорость испарения жидкости меньше, чем скорость сгорания паров.

Устойчивое горение возникает лишь при температуре воспламенения, при которой скорость испарения жидкости становится равной или больше скорости ее горения.

Температурой воспламенения называется наименьшая температура жидкости, при которой она, испаряясь, образует концентрацию пара в смеси с воздухом, способную воспламениться под действием источника зажигания и продолжать гореть после его удаления.

Температура вспышки имеет большое практическое значение.

По температуре вспышки все жидкости, способные гореть, классифицируются на легковоспламеняющиеся (ЛВЖ) с $T_{всп}$ до $61\text{ }^\circ\text{C}$ и горючие (ГЖ) с $T_{всп}$ выше $61\text{ }^\circ\text{C}$.

По температуре вспышки применяемой жидкости определяются типы помещений:

взрывоопасные (В) — с применением ЛВЖ;

пожароопасные (П) — с применением ГЖ.

Температура вспышки необходима для классификации производств по степени пожаровзрывоопасности. Температура вспышки является главным параметром, характеризующим пожарную опасность жидкостей, способных гореть.

Расчет температуры вспышки в закрытом тигле

Существует несколько способов расчета температуры вспышки. Наиболее простым является расчет температуры вспышки для простых жидкостей по формуле Элея (1.40), рассмотренной в разделе 1.9.

Познакомимся с некоторыми примерами расчета температуры вспышки.

Пример 1. Определить температуру вспышки *n*-пропилового спирта, если $t_{кип} = 97,8\text{ }^\circ\text{C}$.

Решение

Определяем коэффициент горючести пропилового спирта ($\text{C}_3\text{H}_7\text{OH}$) по формуле

$$k = 4m_{\text{C}} + m_{\text{H}} + 4m_{\text{S}} + m_{\text{N}} - 2m_{\text{O}} - 2m_{\text{Cl}} - 3m_{\text{F}} - 5m_{\text{Br}},$$

где m_{C} , m_{H} , m_{S} , m_{N} , m_{O} , m_{Cl} , m_{F} , m_{Br} — количество элементов углерода, водорода, серы, азота, кислорода, хлора, фтора, брома в молекуле горючего вещества. Так как в составе горючего вещества присутствует только углерод, водород и кислород, учитываем лишь количество этих элементов.

$$n_{\text{C}} = 3; n_{\text{H}} = 8; n_{\text{O}} = 1;$$

$$K = 4 \cdot 3 + 8 - 2 \cdot 1 = 18.$$

Определяем температуру вспышки пропилового спирта

$$T_{\text{всп}} = 97,8 - 18\sqrt{18} = 97,8 - 76,37 = 21,4 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Ответ. Температура вспышки пропилового спирта 21,4 °С.

Температуру вспышки в закрытом тигле можно определить по следующей формуле, зная нижний температурный предел воспламенения ($t_{\text{н}}$):

$$T_{\text{всп}} = \frac{t_{\text{н}} + 2}{0,875}.$$

Эта формула справедлива при определенных условиях:

$$60 \text{ }^\circ\text{C} > T_{\text{всп}} \geq 0.$$

Пример 2. Определить температуру вспышки растворителя РС-1, если $t_{\text{н}} = 5 \text{ }^\circ\text{C}$.

Решение

Определяем температуру вспышки подстановкой значения нижнего температурного предела воспламенения в вышеприведенное выражение:

$$T_{\text{всп}} = \frac{5 + 2}{0,875} = 8 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Ответ. Температура вспышки растворителя РС-1 равна 8 °С.

Расчет температуры вспышки горючих жидких смесей

На практике часто приходится рассчитывать температуры вспышки различных смесей жидкости. В этом случае можно использовать два простых и сравнительно надежных способа расчета.

Температура вспышки смесей (°С) различных нефтепродуктов и других органических веществ может быть определена по формуле

$$T_{\text{всп}} = \frac{At_a + Bt_b - f(t_a - t_b)}{100}, \quad (1.111)$$

где A — концентрация компонента a в смеси с более высокой температурой вспышки;

B — концентрация компонента b в смеси с низкой температурой вспышки;

t_a — температура вспышки компонента a ;

t_b — температура вспышки компонента b ;

f — эмпирический коэффициент. Определяется по табл. 1.25 (при этом $t_a > t_b$).

Таблица 1.25. Значение эмпирического коэффициента в зависимости от состава смеси

A	B	f	A	B	f
100	0	0	40	60	21,7
95	5	12,0	35	65	19,4
90	10	20,0	30	70	17,0
85	15	26,0	25	75	14,5
80	20	29,2	20	80	11,9
75	25	30,4	15	85	9,2
70	30	30,3	10	90	6,5
65	35	30,0	5	95	3,3
60	40	29,0	0	100	0,0
55	45	27,6	—	—	—
50	50	25,9	—	—	—

Пример 3. Определить температуру вспышки смеси, состоящей из 80 % трансформаторного масла и 20 % бензина А-74. Температура вспышки трансформаторного масла равна 147 °С, температура вспышки бензина А-74 — 37 °С.

Решение. По табл. 1.25 определяем коэффициент f . За компонент A примем трансформаторное масло, так как оно имеет более высокую температуру вспышки. За компонент B — бензин.

$$A = 80 \%, t_a = +147 \text{ °С};$$

$$B = 20 \%, t_b = -37 \text{ °С};$$

$$\text{коэффициент } f = 11,9.$$

По формуле (1.92) определяем температуру вспышки смеси

$$T_{\text{всп}} = \frac{80 \cdot 147 + 20(-37) - 11,9[147 - (-37)]}{100} = 88,3 \text{ °С}.$$

Температуру вспышки двух взаимно растворимых жидкостей можно определить, вычислив нижний концентрационный предел воспламенения смеси. Если принять, что $t_n \approx T_{\text{всп}}$, то рассчитанная температура и есть температура вспышки.

Пример 4. Определить температуру вспышки смеси, состоящей из этилового спирта — 20 % и амилового спирта — 80 % (по массе). Атмосферное давление — 760 мм рт. ст.

Решение. Определяем мольные доли компонентов в смеси.

Молекулярные массы компонентов будут равны:

этилового спирта: $M_1 = 12 \times 2 + 1 \times 6 + 16 \times 1 = 46$;

амилового спирта: $M_2 = 12 \times 5 + 1 \times 12 + 16 \times 1 = 88$.

Определяем мольные доли по формулам

$$r_1 = \frac{g_1/M_1}{\sum g_i/M_i}; \quad r_2 = \frac{g_2/M_2}{\sum g_i/M_i},$$

где g_1, g_2, \dots, g_i — весовой процент каждого компонента в жидкой фазе; M_1, M_2, \dots, M_i — молекулярные массы компонентов.

$$r_1 = \frac{\frac{20}{46}}{\frac{20}{46} + \frac{80}{88}} = 0,32 \text{ (мольная доля этилового спирта);}$$

$$r_2 = 1 - 0,32 = 0,68 \text{ (мольная доля амилового спирта).}$$

Определяем концентрацию компонентов в паровой фазе. Для этого зададимся температурой жидкости, например 20 °С, и определим давление пара при этой температуре, используя метод интерполяции.

Для этилового спирта.

По табл. 17, прил. III определяем давление паров этанола для большего и меньшего давления от заданной температуры и составляем пропорцию для расчета:

20 °С	↗	26 °С	—————	60 мм рт. ст.
	↖	19 °С	—————	40 мм рт. ст.
		7 °С	—————	20 мм рт. ст.
		1 °С	—————	Δр мм рт. ст.

Вычисляем прирост давления как

$$\Delta p_1 = \frac{(60 - 40)(20 - 19)}{26 - 19} = 2,86 \text{ мм рт. ст.};$$

вычисляем давление паров этанола

$$p_1 = 40 + \frac{(60 - 40)(20 - 19)}{26 - 19} = 42,86 \text{ мм рт. ст.}$$

Производим расчеты для паров амилового спирта по аналогичной схеме, давление паров амилового спирта

$$p_2 = 1,0 + \frac{(5-1)(20-13,6)}{34,7-13,6} = 2,2 \text{ мм рт. ст.}$$

Находим давление пара смеси

$$p_{\text{см}} = p_{\text{см}(1)}r_1 + p_{\text{см}(2)}r_2;$$

$$p_{\text{см}} = 42,86 \cdot 0,32 + 2,2 \cdot 0,68 = 13,7 + 1,49 = 15,19 \text{ мм рт. ст.}$$

Определяем концентрацию этилового и амилового спиртов в паровой фазе

$$\varphi_i = \frac{p_i r_i}{p_{\text{см}}}$$

и вычисляем концентрации этилового и амилового спиртов:

$$\varphi_1 = \frac{42,86 \cdot 0,32 \cdot 100}{15,19} = 90,2 \text{ \%};$$

$$\varphi_2 = \frac{2,2 \cdot 0,68 \cdot 100}{15,19} = 9,8 \text{ \%}.$$

Определяем концентрационные пределы воспламенения каждого компонента по справочнику:

$\varphi_{\text{н}} = 3,6 \text{ \%}$ — нижний концентрационный предел воспламенения этилового спирта;

$\varphi_{\text{н}} = 1,2 \text{ \%}$ — нижний концентрационный предел воспламенения амилового спирта.

Определяем давление пара горючей смеси при температуре вспышки (считаем, что $t_{\text{н}} \approx T_{\text{всп}}$).

В формулу $\varphi_{\text{ф}} = \frac{p_{\text{к}} \cdot 100 \text{ \%}}{p_{\text{о}}}$ вместо $\varphi_{\text{ф}}$ подставляем значение концентрации нижнего предела воспламенения смеси (справочные данные) и решаем уравнение относительно $p_{\text{см}}$:

$$p_{\text{см}} = \frac{\varphi_{\text{н}} p_{\text{о}}}{100} \text{ мм рт. ст.};$$

$$p_{\text{см}} = \frac{2,9 \cdot 760}{100} = 22,2 \text{ мм рт. ст.}$$

Методом последовательных приближений определяем температуру вспышки смеси.

Предположим, что температура вспышки смеси равна $25\text{ }^{\circ}\text{C}$. Производим расчет давления пара смеси при этой температуре. Вначале определяем давление пара каждого компонента при температуре $25\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Для амилового спирта:

$$p_2 = 1,00 + 2,1 = 3,1 \text{ мм рт. ст.};$$

$$p_2 = 1,00 + \frac{(5-1)(25-13,6)}{34,7-13,6} = 3,1 \text{ мм рт. ст.}$$

Для этилового спирта:

$25\text{ }^{\circ}\text{C}$	↗	$26\text{ }^{\circ}\text{C}$	—————	$60,00$	мм рт. ст.
	↖	$19\text{ }^{\circ}\text{C}$	—————	$40,00$	мм рт. ст.

$$\Delta p = \frac{(25-19)(60-40)}{26-19} = 17,1 \text{ мм рт. ст.};$$

$$p_1 = 40,0 + 17,1 = 57,1 \text{ мм рт. ст.}$$

Определяем давление паров смеси при температуре $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ как

$$p_{\text{см}} = 57,1 \cdot 0,32 + 3,1 \cdot 0,68 = 20,38 \text{ мм рт. ст.}$$

Следовательно, $T_{\text{всп.см}}$ выше $25\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Предположим, что $T_{\text{всп.см}}$ равна $26\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Определяем давление паров каждого компонента при этой температуре методом интерполяции.

Для этилового спирта

$$p_1 = 60 \text{ мм рт. ст.}$$

Для амилового спирта

$$p_1 = 1,1 + 2,4 = 3,5 \text{ мм рт. ст.}$$

Определяем давление пара смеси при температуре $26\text{ }^{\circ}\text{C}$:

$$p_{\text{см}} = 60 \cdot 0,32 + 3,5 \cdot 0,68 = 21,58 \text{ мм рт. ст.};$$

$$p_{\text{см}} \text{ при } 26\text{ }^{\circ}\text{C} \approx p_{\text{см}} \text{ при } T_{\text{всп}};$$

$$21,58 \text{ мм рт. ст.} \approx 22,2 \text{ мм рт. ст.}$$

Следовательно, за температуру вспышки смеси, состоящей из 20 % этанола и 80 % амилового спирта, можно принять температуру $26\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Но фактически мы рассчитали $t_{\text{н}}$ — нижний температурный предел воспламенения смеси (НТПВ).

Рассчитаем его температуру вспышки по формуле:

$$T_{\text{всп}} = \frac{26 + 2}{0,875} = 32 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Ответ. Температура вспышки смеси, состоящей из 20 % этанола и 80 % амилового спирта равна 32 °С.

Расчет температуры вспышки по методике ГОСТ 12.1.044—89

Для индивидуальных жидкостей расчет температуры вспышки ($T_{\text{всп}}$) можно проводить по методике ГОСТ 12.1.044—89.

Температуру вспышки жидкостей ($T_{\text{всп}}$, °С), имеющих связи, указанные в табл. 1.26, вычисляют по формуле

$$T_{\text{всп}} = a_0 + a_1 t_{\text{кип}} + \sum_{j=2}^n a_j l_j, \quad (1.112)$$

где a_0 — размерный коэффициент, равный минус 73,14 °С;

a_1 — безразмерный коэффициент, равный 0,659;

$t_{\text{кип}}$ — температура кипения исследуемой жидкости, °С;

a_j — эмпирические коэффициенты, приведенные в табл. 1.26;

l_j — количество связей вида j в молекуле исследуемой жидкости.

Средняя квадратическая погрешность расчета δ по формуле (1.112) составляет 13 °С.

Таблица 1.26. Виды связи в веществе и значения коэффициентов a_j

Вид связи	a_j , °С	Вид связи	a_j , °С
C—C	−2,03	C—Cl	15,11
C—C (аром.)	−0,28	C—Br	19,40
C=C	1,72	C—Si	−4,84
C—H	1,105	Si—H	11,00
C—O	2,47	Si—Cl	10,07
C=O	11,66	N—H	5,83
C—N	14,15	O—H	23,90
C≡N	12,13	S—H	5,64
C—S	2,09	P—O	3,27
C=S	−11,91	P=O	9,64
C—F	3,33		

Расчет температуры воспламенения по методике ГОСТ 12.1.044—89

Температурой воспламенения называется наименьшая температура жидкости, при которой, испаряясь, она образует концентрацию пара в смеси с воздухом, способную воспламениться от источника зажигания и продолжать гореть после его удаления.

Температуру воспламенения ($T_{\text{в}}$) индивидуальных жидкостей ($^{\circ}\text{C}$) вычисляют по формуле (1.112), где a_0 — размерный коэффициент, равный $-47,78$ $^{\circ}\text{C}$; a_1 — безразмерный коэффициент, равный $0,882$; a_j — эмпирические коэффициенты, приведенные в табл. 1.27.

Таблица 1.27. Эмпирические значения коэффициента a_j в формуле (1.112)

Вид связи	$a_j, ^{\circ}\text{C}$	Вид связи	$a_j, ^{\circ}\text{C}$
C—C	0,027	C=O	-0,826
C—C (аром.)	-2,069	C—N	-5,876
C=C	-8,980	O—H	8,216
C—H	-2,118	N—H	-0,261
C—O	-0,111		

Расчет производим по методике, аналогичной расчету $T_{\text{всп}}$, приведенному выше.

Содержание работы

Задание 1

Рассчитать температуру вспышки додекана $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{10}\text{CH}_3$, если его НТПВ равен 74 $^{\circ}\text{C}$.

Задание 2

Рассчитать температуру вспышки изоамилового спирта, если его НТПВ равен 38 $^{\circ}\text{C}$.

Задание 3

Рассчитать температуру вспышки изоамилового спирта $[\text{CH}_3\text{CH}(\text{CH}_3)\text{CH}(\text{OH})\text{CH}_3]$, если НТПВ равен 36 $^{\circ}\text{C}$.

Задание 4

Рассчитать температуру вспышки изобутилового спирта, если его температура кипения равна $107,5$ $^{\circ}\text{C}$.

Задание 5

Рассчитать температуру вспышки изооктана, если его температура кипения равна $99,2\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Задание 6

Рассчитать температуру вспышки коричневого спирта ($\text{C}_6\text{H}_5\text{CH}=\text{CH}-\text{CH}_2\text{OH}$), если его температура кипения равна $257,5\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Задание 7

Рассчитать температуру вспышки ксилола, если его НТПВ равен $24\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Задание 8

Рассчитать температуру вспышки лака РА-6, если его НТПВ равен $9\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Задание 9

Рассчитать температуру воспламенения ацетона ($\text{C}_3\text{H}_6\text{O}$) по методике ГОСТ 12.1.044—89, если $t_{\text{кип}} = 56,5\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Задание 10

Рассчитать температуру воспламенения амилового спирта ($\text{C}_5\text{H}_{12}\text{O}$) по методике ГОСТ 12.1.044—89, если его $t_{\text{кип}} = 138\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Методические указания

1. Получите задание от преподавателя и исходные данные для выполнения расчета.
2. Внимательно изучите и проанализируйте разделы 1.7 и 1.10.
3. Внимательно изучите приведенные примеры и формулы (1.111)—(1.112).
4. Произведите расчеты, обоснуйте их и оформите отчет.

Содержание отчета

Отчет должен отвечать требованиям общих методических указаний по выполнению работ, содержать обоснованные выводы по результатам расчетов.

В отчете приведите результаты расчетов температуры вспышки, температуры воспламенения и ответы на контрольные вопросы.

Контрольные вопросы

1. Что называется температурой вспышки?
2. Дайте определение температуры воспламенения.
3. Что характеризует температура вспышки?
4. Какие методы расчета используются для вычисления температуры вспышки и воспламенения?
5. Какие факторы влияют на температуру вспышки и воспламенения? Поясните ответ.

Практическая работа 8

РАСЧЕТ СТЕХИОМЕТРИЧЕСКОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ

Цель работы: научиться рассчитывать стехиометрическую концентрацию.

Общие положения

Стехиометрической концентрацией называется такая концентрация, когда реагирующие вещества взяты в эквивалентных соотношениях.

Эквивалентное соотношение — это такое соотношение реагирующих веществ, когда реакция протекает полностью без отсутствия избытка или недостатка какого-либо из реагирующих веществ.

При стехиометрической концентрации скорость химической реакции будет иметь максимальное значение (в действительности скорость реакции достигает максимума при концентрации несколько выше стехиометрической).

Расчет стехиометрической концентрации необходим для определения стандартной или минимальной температуры самовоспламенения, так как при этой концентрации температура самовоспламенения имеет наименьшее значение.

Стехиометрическая концентрация используется для расчетов максимальной температуры и максимального давления при взрыве, что необходимо для определения площади остекления, ослабленных проемов или вышибных панелей во взрывоопасных помещениях.

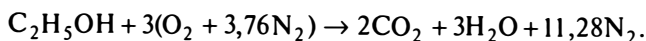
Расчет стехиометрической концентрации ведется по реакции горения путем составления пропорции. Стехиометрическая концентрация может быть выражена в объемных процентах ($\varphi_{\text{сх}}$, % об.) и в граммах на кубометр ($\varphi'_{\text{сх}}$, г/м³).

Рассмотрим некоторые методы расчета стехиометрической концентрации.

Пример 1. Рассчитаем стехиометрическую концентрацию паров этилового спирта в воздухе при $t_1 = 20$ °С и $p_1 = 760$ мм рт. ст.

Решение

1. Составляем уравнение реакции горения спирта в воздухе:



2. Составляем пропорцию.

Горючая система состоит из 1 моля этилового спирта и 14,28 ($3 \cdot 4,76 = 14,28$) моля воздуха. Всего будет 15,28 моля. Общее количество молей горючей системы принимаем за 100 % и находим процент этилового спирта:

$$\begin{array}{rcl} 15,28 & \text{—} & 100 \% \\ 1 & \text{—} & x \% \end{array} \quad x = \frac{1 \cdot 100}{15,28} = 6,5 \%$$

3. Выводим общую формулу для расчета стехиометрической концентрации в объемных процентах:

$$x = \varphi_{\text{сх}}; 15,28 = 1 + 3 \cdot 4,76,$$

где 3 — стехиометрический коэффициент β при кислороде в реакции горения. Следовательно, расчетная формула будет иметь вид:

$$\varphi_{\text{сх}} = \frac{100}{4,76\beta + 1}, \% \text{ об.} \quad (1.113)$$

4. Если стехиометрическая концентрация горючего пара или газа рассчитывается в кислороде, то формула будет иметь вид:

$$\varphi_{\text{сх}} = \frac{100}{\beta + 1}, \% \text{ об.} \quad (1.114)$$

Чтобы рассчитать стехиометрическую концентрацию горючих паров или газов, необходимо знать молекулярную массу вещества и объем одного киломоля газа при заданных условиях.

5. Определяем массу килограмм-молекулы этилового спирта:

$$M = 46 \text{ кг/кмоль.}$$

6. Объем килограмм-молекулы газа при $t_1 = 20^\circ\text{C}$ и $p_1 = 760$ мм рт. ст. будет равен:

$$V_t = \frac{22,4 \cdot 760 (273 + 20)}{273 \cdot 760} = 24 \text{ м}^3/\text{кмоль.}$$

7. По уравнению горения этилового спирта определяем количество киломолей горючего вещества и воздуха. Горючая система состоит из 1 кмоль этилового спирта и 14,28 ($3 \cdot 4,76 = 14,28$) кмоль воздуха. Находясь в газовой фазе, 1 кмоль паров спирта будет занимать такой же объем, как и 1 кмоль любого газа. Поэтому общий объем горючей системы будет $[(1 + 3 \cdot 4,76) \cdot 24] \text{ м}^3$.

Составляем пропорцию:

в $[(1 + 3 \cdot 4,76) \cdot 24] \text{ м}^3$ горючей системы содержится 46 кг спирта;
в 1 м^3 — x кг спирта;

$$x = \frac{46 \cdot 1000}{(1 + 3 \cdot 4,76) \cdot 24} = 125 \text{ кг/м}^3.$$

8. Перейдем к общей расчетной формуле, принимая $\varphi'_{\text{сх}} = x$, $M = 46$, $\beta = 3$; $V_t = 24$:

$$\varphi'_{\text{сх}} = \frac{M \cdot 1000}{(4,76\beta + 1) \cdot V_t} = \frac{46 \cdot 1000}{15,28 \cdot 24} = 125 \text{ кг/м}^3. \quad (1.115)$$

Ответ. Стехиометрическая концентрация паров этилового спирта в воздухе составляет 125 кг/м^3 .

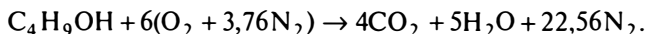
При расчете стехиометрической концентрации в г/м^3 в чистом кислороде формула будет иметь вид:

$$\varphi'_{\text{сх}} = \frac{1000 M}{(\beta + 1)V_t}. \quad (1.116)$$

Пример 2. Рассчитать стехиометрическую концентрацию паров бутилового спирта в воздухе в объемных процентах.

Решение

1. Составляем уравнение реакции горения бутилового спирта в воздухе и определяем стехиометрический коэффициент (β):



2. Определяем стехиометрическую концентрацию паров бутилового спирта в воздухе в объемных процентах по формуле (1.113):

$$\varphi_{\text{сх}} = \frac{100}{4,76 \cdot 6 + 1} = 3,38 \% \text{ об.}$$

Ответ. Стехиометрическая концентрация паров бутилового спирта в воздухе составляет 3,38 % об.

Пример 3. Рассчитать стехиометрическую концентрацию паров ацетона в воздухе при температуре 15 °С и давлении 740 мм рт. ст.

Дано: горючее вещество — ацетон CH_3COCH_3 (брутто-формула $\text{C}_3\text{H}_6\text{O}$). $t_1 = 15 \text{ }^\circ\text{C}$; $p_1 = 740 \text{ мм рт. ст.}$ Найти $\varphi'_{\text{сх}}$.

Решение

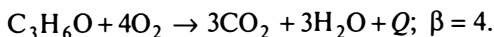
1. Определяем массу килограмм-молекулы ацетона:

$$M = 12 \cdot 3 + 1 \cdot 6 + 16 = 58 \text{ кг/кмоль.}$$

2. Определяем объем килограмм-молекулы ацетона при заданных условиях:

$$V_1 = \frac{22,4 \cdot 760(273 + 15)}{273 \cdot 740} = 25,2 \text{ м}^3/\text{кмоль.}$$

3. По уравнению реакции горения определяем стехиометрический коэффициент (β):



4. Определяем стехиометрическую концентрацию паров ацетона по (1.115):

$$\varphi'_{\text{сх}} = \frac{58 \cdot 1000}{(1 + 4,76 \cdot 4)25,2} = 114,8 \text{ г/м}^3.$$

Ответ. Стехиометрическая концентрация паров ацетона составляет 114,8 г/м³.

Содержание работы

Задание 1

Рассчитать стехиометрическую концентрацию паров пропилового спирта с воздухом в объемных процентах.

Задание 2

Рассчитать стехиометрическую концентрацию паров метанола с воздухом в объемных процентах.

Задание 3

Сколько диэтилового эфира должно испариться в помещении объемом 200 м^3 , чтобы образовалась стехиометрическая концентрация при температуре 10°C и давлении 750 мм рт. ст. ?

Задание 4

Рассчитать, при какой концентрации температура самовоспламенения ацетилен в воздухе будет самой низкой.

Задание 5

Рассчитать стехиометрическую концентрацию бутана с воздухом в г/м^3 , $t = 30^\circ \text{C}$, $p = 97 \text{ кПа}$.

Задание 6

Рассчитать стехиометрическую концентрацию паров пентана в воздухе при температуре 18°C и давлении 750 мм рт. ст.

Задание 7

Рассчитать стехиометрическую концентрацию насыщенных паров этанола и определить, при какой температуре она образуется.

Задание 8

Сколько карбида кальция должно прореагировать с водой, чтобы в помещении объемом 480 м^3 образовалась стехиометрическая концентрация ацетилен в воздухе при нормальных условиях?

Методические указания по выполнению задания

1. Получите задание от преподавателя и исходные данные для выполнения расчета.
2. Ознакомьтесь с методами расчета стехиометрической концентрации.
3. Внимательно изучите предложенные в работе примеры и формулы (1.113)—(1.116).
4. Произведите расчеты и оформите отчет.

Содержание отчета

Отчет должен отвечать требованиям общих методических указаний по выполнению работ, содержать обоснованные выводы по результатам расчетов.

В отчете приведите результаты расчетов стехиометрической концентрации и ответы на контрольные вопросы.

Контрольные вопросы

1. Что понимается под стехиометрической концентрацией? Подтвердите примерами.
2. Как производится расчет стехиометрической концентрации? Поясните используемые формулы.
3. В чем измеряется стехиометрическая концентрация?
4. При каких расчетах используются значения стехиометрической концентрации?
5. Составьте уравнение реакции горения метанола, этанола, ацетилена и определите стехиометрический коэффициент.

Раздел 2

ВЗРЫВ

Взрывом называют физическое или/и химическое превращение вещества, при котором его энергия быстро переходит в энергию сжатия и движения самого вещества или продуктов его превращения и окружающей среды. Энергия взрыва может быть различной. Выделение химической, электрической, ядерной, термоядерной, тепловой, кинетической энергии, энергии упругого сжатия способно сопровождаться взрывными процессами. Например, при электроискровом способе разрушения материалов используются микровзрывы, источником энергии которых служит электрический разряд, а носителем энергии — продукты испарения и разложения или просто нагрева среды, в которой разряд осуществляется. Взрыв, вызванный разрушением баллонов со сжатым газом, паровых котлов, сосудов высокого давления, также может протекать с большой скоростью и вызывать серьезные повреждения в окружающей среде.

Таким образом, под взрывом понимается явление, связанное с внезапным изменением состояния вещества, сопровождающееся резким звуковым эффектом и быстрым выделением энергии, приводящим к разогреву, движению и сжатию продуктов взрыва и окружающей среды.

При взрыве выделяющаяся энергия приводит к развитию двух основных процессов:

- дефлаграции;
- детонации.

Дефлаграция — процесс дозвукового горения, при котором образуется быстро перемещающаяся зона (фронт) химических превращений. В большинстве перемешанных газопаровоздушных смесей при возникновении горения со взрывом распространение пламени по исходной смеси происходит со сравнительно низкой скоростью, соответствующей нескольким метрам в секунду. В самоподдерживающейся волне этого процесса, фронт реакции которого продвигается по

горючей смеси благодаря теплопроводности и конвекции в направлении от сгоревшего газа к не сгоревшему. При этом в открытом пространстве не происходит повышения давления, обусловленного ускорением реакции. В замкнутом же объеме повышение давления носит пространственно равномерный характер и является в основном результатом роста в нем температуры смеси. Такое повышение среднего давления для типичных углеводородо-воздушных смесей достигает 0,6—0,8 МПа, что в условиях замкнутого объема может привести к разрушению ограждающих очаг горения сплошных конструкций.

Дефлаграция способна симметрично распространяться во все стороны от источника зажигания. Она характеризуется генерацией низкой волны давления, не обладающей ударным действием.

Взрыв в форме дефлаграционного горения также называют *тепловым взрывом*.

Тепловой взрыв — явление горения, возникающее при самовоспламенении системы и сопровождающееся выделением большого количества теплоты.

При тепловом самовоспламенении причиной ускорения реакции окисления и возникновения горения является превышение скорости выделения теплоты в системе над скоростью теплоотвода. Возникающие при таком горении химические экзотермические реакции развиваются с большими скоростями, ускоряя процессы самовоспламенения. При этом система взрывается с выделением большого количества теплоты, приводя к тепловому взрыву.

При тепловом взрыве передача энергии от одного слоя горючего вещества к другому происходит путем теплопроводности. Такие взрывы характерны, например, для горения легковоспламеняющихся жидкостей (ЛВЖ), горючих жидкостей (ГЖ), смесей газов и паров с воздухом, а также порохов и пр.

Детонация (от средневекового латинского *detonatio* — *взрыв*; латинского *detono* — гремлю) — распространение со сверхзвуковой скоростью зоны быстрой экзотермической химической реакции, следующей за фронтом ударной волны.

Взрыв в форме детонации — это процесс передачи энергии, обусловленный прохождением ударной волны со сверхзвуковой скоростью. В случае детонационного взрыва газы образуются очень быстро, давление возрастает мгновенно до больших величин. Возникновение повышенного давления в области взрыва вызывает образование в окружающей среде ударной волны с сильным разрушающим действием.

Ударная волна — тонкая переходная область, распространяющаяся со сверхзвуковой скоростью, в которой происходит резкое увеличение плотности, давления и температуры вещества.

Явление дефлаграции и детонации наблюдается при взрывах, в основном, в газо-, паровоздушных смесях.

2.1. Разновидности взрывов

Взрывы подразделяются в зависимости от природы происхождения, агрегатного состояния среды, условий, вызывающих возникновение взрыва.

По природе происхождения взрывы подразделяются на химические и физические.

2.1.1. Химические взрывы

К **химическим взрывам** относятся процессы быстрого химического превращения вещества, проявляющиеся горением и характеризующиеся выделением тепловой энергии за короткий промежуток времени и в таком объеме, что образуются волны давления, распространяющиеся от источника взрыва.

Химические превращения происходят в результате следующих реакций:

- разложения;
- окислительно-восстановительных;
- поляризации, изомеризации и конденсации.

По характеру взрывного процесса в пространстве все химические взрывы подразделяются на:

- точечные (сосредоточенные);
- объемные.

Точечными взрывами являются, в основном, взрывы твердого или жидкого вещества, занимающие малый объем относительно зоны воздействия. Примером может служить взрыв заряда взрывчатого вещества, например, тринитротолуола и др.

Объемный взрыв представляет собой взрыв газо-, паро- или пылевоздушного облака, занимающего значительный относительно зоны воздействия объем. При таком взрыве образуется значительное паро-, газовоздушное облако.

Облако представляет собой разогретую горящую смесь, называемую огненным шаром. Огненный шар — это крупномасштабное диффузное пламя сгорающей массы горючего или парового облака, поднимающегося над поверхностью земли (ГОСТ Р 12.3.047—98). Огненный шар распространяется в среде со значительной скоростью.

Итак, химические взрывы — это взрывы, связанные с внезапным изменением химического состояния вещества, сопровождающиеся крайне быстрым выделением энергии и образованием сжатых газов, способных производить механическую работу.

2.1.2. Физические взрывы

К **физическим взрывам** относятся процессы, приводящие к возникновению внутреннего давления, которое превышает предельно допустимые значения для оборудования.

К физическим относятся взрывы:

- сосудов, работающих под давлением;
- оборудования из-за увеличения давления внутри него выше нормы;
- электрические;
- за счет энергии фазового перехода «жидкость—кристалл», а также физическая детонация.

Взрывы сосудов, работающих под давлением

Причины, вызывающие взрывы:

- снижение прочности стенок сосуда;
- заполнение емкости сосуда сверх нормы;
- дефекты, допущенные при монтаже, ремонте сосуда;
- конструктивные недостатки сосуда;
- коррозия стенок сосуда, т. е. разрушение материала, вещества вследствие физико-химического воздействия на них других веществ, находящихся в сосуде или внешней среде;
- эрозия материала сосудов, т. е. разрушение материалов стенок вследствие механического воздействия находящихся в сосуде веществ и материалов или вследствие электрических разрядов.

При таких взрывах возникающее внутреннее давление в сосуде превышает предельно допустимое значение. Это приводит к разгерметизации сосуда с последующим взрывом. В случае если хранящееся в сосуде вещество нагрето до температур, превышающих предельно

допустимые значения, происходит химическое превращение этого вещества, которое приводит к росту внутреннего давления.

Взрывы оборудования из-за увеличения давления внутри него

Причины возникновения таких взрывов:

- внезапное уменьшение или прекращение расхода воды в паровых котлах;
- поломка приборов автоматики, контролирующей подачу пара;
- нарушение температурного режима оборудования, приводящее к нагреванию паров или газов выше установленного режима;
- снижение уровня воды (упуск) в паровых котлах.

Упуском воды называется такое нарушение работы котла или другого оборудования, при котором уровень воды в них снижается настолько, что часть поверхности нагрева оборудования перестает омываться водой и начинает перегреваться.

Электрические взрывы

Электрические взрывы — это мощные искровые разряды в газах (например, молния) и взрывы металлических проводников (ЭВП) при пропускании через них токов большой плотности (порядка 10^7 А/см²) за 10^{-5} — 10^{-7} с.

При газовых разрядах разность электрических потенциалов выравнивается за малые промежутки времени, так что плотность выделяемой при этом энергии соизмерима с параметрами ядерных взрывов.

Взрыв металлических проводников (проволочек) обусловлен быстрым испарением металла и переходом его в плазменное состояние с последующим расширением плазмы и преобразованием тепловой энергии в потенциальную энергию сжатия. Чрезвычайно быстрый нагрев проволочек до температуры 10^4 К способствует их существенному перегреву выше точки кипения металла, при этом наблюдается быстрое расширение паров металла с образованием ударных волн. В табл. 2.1 приведены энергии, необходимые для электрического взрыва проводников (ЭВП) различных металлов.

Таким образом, ЭВП — это резкое изменение физического состояния металла в результате интенсивного выделения в нем энергии, приводящее к нарушению металлической электропроводности и со-

Таблица 2.1. Энергия испарения, необходимая для ЭВП

Металл проволоки	$T_{\text{кип}}, ^\circ\text{C}$	Диаметр проволоки	Энергия испарения, Дж
Железо	3070	0,32	410
Медь	2590	0,38	440
Алюминий	2500	0,32	194
Олово	2200	0,32	143
Свинец	1740	0,33	59
Цинк	907	0,33	94
Кадмий	767	0,31	70

проводящееся образованием ударной волны и электромагнитного излучения.

Взрывы за счет энергии фазового перехода «жидкость—кристалл»

Причины, вызывающие взрывы:

- вскипание расплава;
- быстрая (мгновенная) перекристаллизация расплава, т. е. быстрое образование кристалла.

Исследования механизмов таких взрывов показали, что их не удается объяснить с позиции «вскипания» жидкости с последующим образованием метастабильного состояния. Энергия таких взрывов определяется энергией скрытого перехода в системе «жидкость—кристалл».

Физическая детонация

При смешении горячей и холодной жидкостей, когда температура одной из них значительно превышает температуру кипения другой (например, при выливании расплавленного металла в воду), может возникать физическая детонация (physiral detonation, vapour explosion).

Механизм протекания **физической детонации** заключается в быстром (взрывном) испарении парожидкостной смеси, образовавшейся при смешении горячей и холодной жидкостей. При этом наблюдается процесс фрагментации капель расплава, обеспечивающий быстрый теплоотвод и перегрев холодной жидкости. В результате возникает

ударная волна с избыточным давлением в жидкой фазе, достигающим тысячи атмосфер.

Физическая детонация происходит также при попадании холодных сред на нагретые до высоких температур поверхности.

Примеры. Наиболее тяжелый по своим последствиям физический взрыв произошел в 1993 г. на Днепровском металлургическом комбинате в результате попадания в доменную печь с обрушившейся шихтой большого количества воды (от 1 до 3 т) с последующим быстрым испарением и повышением давления в объеме печи, что привело к ее частичному разрушению с выбросом горячих газов. При взрыве пострадали 29 человек, из них 18 погибли.

На Новолипецком металлургическом комбинате 7 июня 1991 г. из-за попадания воды в конвертор из прогоревшего резервуара (торкретфурмы) произошел взрыв с выбросом из конвертора перегретого пара и продуктов расплава. В результате этого взрыва пострадали семь человек, были повреждены элементы котла-утилизатора и газотводящего тракта, разрушена подкрановая балка и др.

2.1.3. Комбинированные взрывы

Взрывы комбинированные, т. е. взрывы, сопровождающиеся выделением энергии и образованием сжатых газов в результате последовательного протекания физического и химического взрывов (или сначала химического взрыва, затем физического), работа которых полностью или частично суммируется.

Комбинированные взрывы по природе механизма возникновения энергии подразделяют следующим образом:

- явление BLEVE;
- ядерные взрывы;
- термоядерные взрывы.

Рассмотрим подробно каждый из них.

BLEVE (*Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion*) — взрыв расширяющихся паров вскипающей жидкости.

Сущность этого явления заключается в следующем: при наличии источника воспламенения происходит перегрев горючей жидкости или сжиженного горючего газа. Резкое падение давления в сосуде вызывает вскипание находящейся в нем жидкости и образование воздушной ударной волны. Ударная волна вызывает разрушения оборудования, выброс газо-, паровоздушного облака.

Причины, вызывающие явление BLEVE:

- емкости под давлением, наполненные легкокипящей жидкостью (чаще всего — сжиженным горючим газом), подвергаются внешнему нагреву;
- в процессе нагрева отмечается рост внутреннего давления.

BLEVE — термин, который используется для описания целой совокупности явлений, сопровождающих внезапное разрушение сосуда (баллона, резервуара) с перегретой горючей жидкостью или со сжиженным горючим газом при наличии источника воспламенения. Например, причиной аварий на объектах СУГ (сжиженных углеводородных элементов) является образование огненных шаров и взрывные явления типа BLEVE.

Для образования явления BLEVE необходимы следующие условия:

- жидкость, хранящаяся в герметичном сосуде под давлением, к моменту вскипания (за счет сброса давления) должна быть «термодинамически перегретой» выше некоторого характерного предела относительно состояния насыщения при атмосферном давлении;
- в результате аварийной разгерметизации или разрушения корпуса сосуда должно произойти резкое падение давления над поверхностью раздела жидкой и паровой фаз.

Нарушение целостности сосуда может происходить из-за:

- переполнения сосуда СУГ с последующим его нагревом;
- внешних механических воздействий осколков от разрушения других сосудов, переворачивания и пробоя цистерн во время транспортирования и т. п.;
- внешних тепловых воздействий, таких как локальный перегрев корпуса и связанное с этим резкое снижение его механической прочности.

В тех случаях когда при сбросе давления не достигается граница перегрева, мгновенного вскипания жидкости в объеме не происходит. За счет возникшей неравновесности, т. е. временного термодинамического перегрева происходит превращение части внутренней энергии в теплоту, которая далее реализуется испарением части жидкости (по обычному механизму поверхностного кипения на центрах парообразования). Это приводит к равномерному понижению температуры по всей массе жидкости.

При «провале» за границу предельного перегрева произойдет «паровой взрыв», давление в сосуде может возрасти в сотни раз, вследствие чего сосуд будет разорван. За счет резкого сброса давле-

ния часть жидкости превратится в пар, а оставшаяся часть уже «переохлажденной» жидкости будет практически полностью захвачена резко расширяющимся паром и вынесена с ним в окружающее пространство в виде аэрозоля. В результате образуется аэрозольное облако расширяющихся паров, которое с большой вероятностью воспламенится за счет взаимодействия разрушающихся частей сосуда друг с другом, соударения, трения и будет сгорать с высокой интенсивностью и мощным излучением тепла в окружающее пространство.

За счет исходного эффекта расширения при разрушении сосуда высокого давления, а также за счет расширения продуктов сгорания образуется ударная волна, способная вызвать разрушения в прилегающей к сосуду зоне.

Дополнительным фактором опасности при возникновении эффекта BLEVE являются осколки от разорвавшегося корпуса, увеличивающие зону потенциальной угрозы вокруг резервуаров для хранения сжиженных газов при температуре окружающей среды.

При быстром сгорании облака, как уже отмечалось, происходит мощное излучение теплоты в окружающее пространство, способное вызвать возгорание горючих материалов и термическое поражение людей на значительных расстояниях от места аварии.

Стадии образования расширяющихся паров вскипающей горючей жидкости:

- действие пламени на сосуд, находящийся под давлением;
- рост давления в сосуде;
- перегрев и потеря прочности стенок, не смоченных жидкостью и, как следствие, их разрушение под действием внутреннего давления с образованием волны давления в окружающей среде;
- выброс с одновременным диспергированием жидкости в окружающее пространство из сосуда и мгновенное ее испарение с образованием парового облака;
- воспламенение этого облака с образованием волн давления и огненного шара.

Ядерные взрывы

К взрывам, связанным с более фундаментальными превращениями веществ, относятся ядерные взрывы. При ядерном взрыве происходит превращение атомных ядер исходного вещества в ядра других элементов, которое сопровождается освобождением энергии связи элементарных частиц (протонов и нейтронов), входящих в состав

атомного ядра. Ядерный взрыв основан на способности определенных изотопов тяжелых элементов урана или плутония к делению, при котором ядра исходного вещества распадаются, образуя ядра более легких элементов. При делении всех ядер, содержащихся в 50 г урана или плутония, освобождается такое же количество энергии, как и при детонации 1000 т тринитротолуола.

Термоядерные взрывы

Существует другой тип ядерной реакции — реакция синтеза легких ядер, сопровождающаяся выделением большого количества энергии. Силы отталкивания одноименных электрических зарядов (все ядра имеют положительный электрический заряд) препятствуют протеканию реакции синтеза, поэтому для эффективного ядерного превращения такого типа ядра должны обладать высокой энергией. Такие условия могут быть созданы нагреванием веществ до очень высокой температуры. Процесс синтеза, протекающий при высокой температуре, называют **термоядерной реакцией**. При синтезе ядер дейтерия (изотопа водорода 2H) освобождается почти в три раза больше энергии, чем при делении такой же массы урана. Необходимая для синтеза температура достигается при ядерном взрыве урана или плутония.

Таким образом, если поместить в одном и том же устройстве делящееся вещество и изотопы водорода, то может быть осуществлена реакция синтеза, результатом которой будет взрыв огромной силы — **термоядерный взрыв**.

2.1.4. Взрывы в средах

Взрывы происходят в различных средах. В зависимости от места первоначального выделения энергии взрывы подразделяются:

- воздушный взрыв — это взрыв заряда в газе в отсутствие отражающих поверхностей;
- подземный взрыв — взрыв заряда в грунте;
- подводный взрыв — взрыв заряда в воде;
- наземный взрыв — взрыв заряда на поверхности грунта (поверхностный).

Действие взрыва зависит от характеристик среды и от условий его осуществления, таких как глубина (высота) под или над границей раздела фаз.

Воздушные взрывы

При взрыве в воздухе продукты взрыва движутся вслед за ударной волной, «подпитывая» ее. Затем характер ударной волны определяется запасом энергии, переданной ей продуктами взрыва в процессе их расширения.

Для расчета избыточного давления используются многочисленные методы, учитывающие состав горючего вещества (индивидуальное вещество или смесь горючих веществ), место взрыва (открытое пространство или закрытое помещение) и т. д. В качестве иллюстрации приведем метод определения избыточного давления для воздушных взрывов по формуле М.А. Садовского:

$$\Delta p = 0,084 \frac{\sqrt[3]{m}}{r} + 0,27 \left(\frac{\sqrt[3]{m}}{r} \right)^2 + 0,7 \left(\frac{\sqrt[3]{m}}{r} \right)^3, \text{ МПа,}$$

где m — масса тротилового эквивалента взрывного вещества, кг;

r — расстояние до центра взрыва, м.

Более подробно ознакомимся с методами расчета подобных взрывов в разделе 3.

Подземные взрывы

При подземном взрыве происходит передача энергии внешней среде путем прогрева ее выделяющейся теплотой. По грунту распространяются тепловая и ударная волны.

Особенностью подземного взрыва является большая плотность грунта, которая на три порядка больше плотности воздуха.

Ударная волна в грунте, в отличие от ударной волны в воздухе, является неустойчивой, так как встречающийся на пути ударной волны грунт имеет различную структуру (почва, скальные породы и пр.).

Подземные взрывы являются контролируруемыми взрывами. В зависимости от глубины заложения заряда в грунт принято различать:

- камуфлетный подземный взрыв;
- подземный взрыв с выбросом грунта.

Особенности таких взрывов заключаются в следующем:

- при камуфлетном взрыве не происходит раскрытия грунтового канала (выброса грунта в атмосферу);

- при подземном взрыве с выбросом грунта происходит раскрытие грунтового купола и образование воронки выброса.

Подводные взрывы

При подводном взрыве в момент выхода детонационной волны на поверхность начинает распространяться ударная волна. Вслед за ударной волной движется граница раздела между продуктами детонации и водой. При этом в воде образуется полость с газообразными продуктами детонации, обладающими колоссальной энергией.

Давление на фронте ударной волны определяется по формуле

$$p = 533 \left(\frac{\sqrt[3]{G}}{R} \right)^{1,13},$$

где G — масса заряда взрывчатого вещества (ВВ), кг;

R — расстояние от заряда ВВ до точки наблюдения, м.

2.2. Случайные взрывы

В зависимости от причин, вызывающих взрыв, принято разделить взрывы на контролируемые и неконтролируемые.

Контролируемые взрывы используются для решения экономических задач. Наиболее часто применяют такие взрывы для ведения горных разработок, в сейсморазведке, при строительстве подземных сооружений, в военных целях. Параметры контролируемых взрывов строго регламентированы в соответствии с нормативными документами.

Неконтролируемые взрывы происходят случайно, поэтому их называют случайными.

Термин «случайный взрыв» включает широкий спектр взрывов, и каждый из них в отдельных своих проявлениях отличается от остальных. Причинами таких взрывов чаще всего являются процессы горения.

Случайные взрывы происходят:

- при изготовлении, хранении, транспортировке горючих, взрывоопасных веществ;
- нарушении технологических режимов, поломке оборудования.

Чаще всего взрывы имеют место в химической, нефтеперерабатывающей промышленности, при утечке природного газа и т. д.

Классификация случайных взрывов

Случайные взрывы объединены в группы, каждая из которых имеет отличительные особенности.

Случайные взрывы подразделяются:

- на взрывы газов, паров и пыли в замкнутых объемах без избыточного давления;
- взрывы сосудов с газом под давлением;
- взрывы, вызванные горением;
- взрывы емкостей с перегретой жидкостью;
- взрывы неограниченных облаков пара;
- физические (паровые) взрывы и др.

2.2.1. Взрывы паров горючего и пыли в замкнутых объемах

Такие взрывы, как правило, происходят при неисправности оборудования. Горючее подтекает в ограждение, пары его смешиваются с воздухом и образуется горючая смесь, которая вступает в контакт с уже имеющимися парами.

Взрывы случаются в жилых домах при утечке газа. В результате происходят распространение и значительное ускорение пламени, приводящие к пожарам и значительным разрушениям.

Примером взрыва горючих паров и газов является катастрофа, произошедшая 26 февраля 2006 г в г. Ангарске на лакокрасочном предприятии.

Наиболее распространены взрывы пыли. Взрывы пыли в замкнутом пространстве имеют более длительную историю, чем взрывы паров и газов. Это объясняется тем, что пары и газы в качестве топлива начали использоваться относительно недавно. Взрывы же пыли происходят в котельных, на предприятиях химической промышленности, в фармацевтической индустрии, угольных шахтах, мукомольных предприятиях.

Взрыв пыли в замкнутом объеме может привести к катастрофическим последствиям.

Практически все органические пыли и некоторые неорганические или металлические пыли сгорают в воздухе и могут привести к взрывам.

Для возникновения таких взрывов необходимы следующие условия:

- высокая концентрация пыли в замкнутых объемах (помещениях реакторов, топочных устройствах, трубопроводах и пр.);
- спонтанное воспламенение пыли.

Для того чтобы облако пыли взорвалось, необходима такая концентрация пыли, при которой характерное расстояние поглощения и рассеяния света составляет примерно 0,2 м. Подобные облака, как правило, непрозрачны, и концентрация пыли в них выше переносимой человеком. Такие условия могут достигаться лишь внутри трубопроводов и специального оборудования, т. е. в закрытых объемах.

Взрывы пыли склонны к спонтанному воспламенению. Воспламенение возникает от источника зажигания (искра, открытый огонь и т. д.) при нижнем или верхнем концентрационных пределах воспламенения.

Пример. Рассмотрим типичную последовательность событий при взрыве пыли. Вначале происходит небольшой взрыв в какой-либо части помещения или оборудования. Затем возникают движение пыли и вибрация оборудования от ударной волны, образующейся от взрыва. Это приводит к тому, что слой пыли, находящейся в помещении, поднимается в воздух. Эта пыль является топливом для более сильного второго взрыва, который и вызывает основные разрушения.

В другой типичной ситуации масса пыли начинает тлеть либо из-за спонтанного воспламенения, например, когда слой пыли покрывает горячий участок оборудования (кожух электромотора, обойму электролампы). Рабочий, обнаружив очаг горения, пытается ликвидировать его либо с помощью химического огнетушителя, либо струей воды. Это приводит к тому, что пыль разбрасывается и образуется облако с большим количеством пыли, часть которой горит. Усиление горения приводит к взрыву.

Для взрывов пыли в помещении, также как и для взрывов газов и паров, характерно существование двух предельных случаев. В замкнутом объеме с малым отношением длины сосуда к диаметру ($L/d \approx 1$) следует ожидать простого взрыва за счет избыточного давления. В конструкциях с большим отношением L/d может возникать ускорение пламени вплоть до детонационной скорости. В этом случае разрушения носят локальный характер и оказываются достаточно серьезными. Осколки могут разбрасываться на значительное расстояние, а внешняя взрывная волна может быть очень сильной.

2.2.2. Взрывы сосудов с газом под давлением

Простые взрывы (нераагирующие газы)

Инертные газы (азот, аргон и др.), находящиеся в сосудах под давлением, могут вызывать взрывы. Причины простых взрывов сосудов под давлением можно подразделить на две группы.

К первой группе относятся нарушения целостности корпуса, например, за счет поломки какого-либо узла, повреждения или коррозии корпуса, неправильной эксплуатации. При этом сосуд может выйти из строя в любое время.

Вторая группа аварий связана с перегревом сосуда, например, за счет нарушения электронагревания или нарушения режима работы топочного устройства. В этом случае давление газа в сосуде повышается, а прочность корпуса понижается до тех пор, пока не произойдет разрушение сосуда. Первичные осколки, образованные подобными взрывами, бывают очень опасными.

Имеют место и взрывы сосудов под небольшим давлением — это взрывы паровых котлов. Например, крупный паровой котел общего назначения взорвется, если внутреннее давление повысится лишь на 10—15 кПа. Повышение давления может произойти как в результате взрыва при горении в топке, так и вследствие утечки пара в топку, вызванной повреждением крупной трубы или водяного коллектора. В этом случае пар поступает в топку с такой скоростью, что сброс избыточного давления становится невозможным. Из-за нарастания давления котел раздувается, округляется и может просто деформироваться без разрушения. Авария приобретает более серьезный характер, когда котел разрушается. Подобные аварии приводят обычно к небольшим разрушениям окружающего оборудования, хотя сам котел повреждается серьезно.

Примером такого взрыва является взрыв парового котла, произошедший в Бангладеш, г. Савар, 11 апреля 2005 г. на ткацкой фабрике. Этот взрыв привел к значительным разрушениям.

Взрывы, вызванные горением

Особенно чувствительны к взрывам, вызванным горением, магистрали со сжатым воздухом. Горючим веществом в этом случае являются масляные или нагаро-масляные отложения на стенках. При таких взрывах разрушения локализованы, что типично для взрывов в сосудах с большим отношением длины к диаметру L/D . Рассмотрим

пример взрыва нефтепровода. В результате пожара, возникшего на нефтеперерабатывающем заводе, возник взрыв, принесший значительные разрушения и материальный ущерб. Взрыв произошел вследствие неисправности оборудования: пары компрессорного масла смешались в магистрали с обогащенным кислородом воздухом и детонировали. Во многих местах магистрали оказались расщепленными на длинные полосы, особенно в местах изгиба трубы.

Такие взрывы бывают часто. Причины возникновения взрывов, как правило, — неисправность оборудования, халатность персонала и его низкая квалификация.

Взрывы газовых емкостей с последующим горением в атмосфере

Разрушения при этом типе взрывов подобны взрывам, вызванному горением. Основное различие заключается в образовании в этом случае *огненного шара*, размер которого зависит от количества выброшенного в атмосферу газообразного горючего. Если в емкости находится газообразное топливо, то его количество намного меньше того, которое может храниться в той же емкости в жидком виде. Поэтому последствия таких огненных шаров не столь серьезны, как в случае взрывов емкостей с перегретой жидкостью.

Взрывы химического реактора

Взрывы химических реакторов в основном случаются вследствие того, что происходит нарушение системы контроля за реакцией, как правило, экзотермической (например, слишком большое количество катализатора, выходит из строя система охлаждения, нарушается перемешивание и т. п.). В случае выхода из-под контроля жидкостного реактора скорость роста давления невысока, и реактор разрушается, как эластичное тело. Если реактор жидкостной с температурой выше температуры кипения (что, как правило, и бывает), то взрыв происходит по типу взрывов сосудов с перегретой жидкостью. Если реактор газовый, то разрушение носит взрывной характер, как взрыв сосуда под давлением.

Взрывы атомного реактора

Взрывы атомного реактора происходят за счет неконтролируемого развития ядерной реакции либо за счет простого взрыва при повышенном давлении. Атомные реакторы сконструированы таким образом, чтобы аварии не могли привести к чему-либо, хотя бы отдаленно напоминающему взрыв атомной бомбы. Тем не менее, по прогнозу

специалистов, наиболее серьезная авария может включать расплавление сердечника реактора, проход расплавленной массы через реактор и (или) систему защиты, это приведет к физическому взрыву при перемешивании с более холодными жидкостями вне реактора. Однако следует помнить, что если выход из-под контроля атомного реактора вызывает разрушение корпуса, то повреждения, причиняемые, взрывом, можно не учитывать. Дело в том, что выброс радиоактивного материала с большим периодом полураспада нанесет столь серьезный ущерб всему окружению, что повреждения, вызванные взрывом, можно рассматривать как несущественные.

2.2.3. Взрывы емкостей с перегретой жидкостью

При перегреве жидкости, хранящейся в емкости, наблюдается явление *BLEVE*.

Перегревы происходят при разрыве емкости с жидкостью в очаге пожара. В этом случае создается давление паров жидкости, превышающее атмосферное. Емкость с перегретой жидкостью разрушается. Поскольку емкость пластична, процесс разрушения относительно медленный, и образуется небольшое число крупных осколков. Эти осколки, на внутренней поверхности которых находится быстроиспаряющаяся жидкость, могут приобрести большую скорость и разлететься на значительное расстояние, вызывая возгорания и приводя к пожару. Взрывная волна, образуемая таким взрывом, обычно довольно слабая, и испарение жидкости в этом случае довольно медленное и вызывает лишь небольшое повышение давления.

Причины, вызывающие перегрев жидкости с последующим взрывом

Внешний нагрев

В случае если жидкость в емкости является горючей, взрыв вызывается пламенным нагревом от внешнего источника. В этом случае BLEVE приводит к появлению подпитываемого топливом огненного шара, продолжительность горения и размер которого определяются общей массой жидкости в емкости в момент взрыва.

Примеры. К настоящему времени наиболее впечатляющие и опасные взрывы описываемого типа случались на железнодорожном транспорте. Аварии происходили с железнодорожными цистернами, перевозящими горючие сжиженные газы: нефтяной газ, про-

пан, пропилен, бутан, винилхлорид и т. п. Типичное развитие аварии начиналось с того, что грузовой поезд, в составе которого имелось несколько цистерн, сцепленных вместе, сходил с рельсов. Цистерны нагромождались друг на друга. Нарушалась целостность либо системы напуска, либо самой цистерны, и выходящий газ загорался. Образовавшийся факел нагревал соседние цистерны, что приводило к открытию предохранительных клапанов на этих цистернах и образованию новых факелов. Передача тепла от факелов к цистернам в конечном итоге приводила к их взрыву по типу BLEVE. Взрывы способствовали нагромождению цистерн, выбросу отдельных кусков цистерн, образованию небольшой взрывной волны и огненному шару. Пожары продолжались длительное время, и нагроможденные цистерны в течение 3—4 часов, а иногда и нескольких дней, по очереди взрывались по типу BLEVE. Были случаи, в которых происходило до шести взрывов такого типа. Подобная авария случилась в Кресент-Сити в США. Удалось избежать описанного выше события при аварии, произошедшей в Уфе 18 января 2005 г. В перевернутой цистерне не возникло BLEVE, так как опрокидывание цистерн с мазутом и пропанобутановой смесью привело к выливанию на землю десятков тонн мазута.

Выход из-под контроля химического реактора

Химические реакторы, содержащие под высоким давлением жидкость, в которой совершается *экзотермическая химическая реакция*, могут стать источником аварии по типу BLEVE, сходному со взрывом емкостей с перегретой водой, температура которой выше 100 °С, а давление пара превышает атмосферное.

2.2.4. Взрывы неограниченных облаков пара

Взрыв неограниченного облака пара может произойти в результате стечения обстоятельств. Во-первых, необходим массовый выброс горючего (например, углеводорода) либо в атмосферу, либо на поверхности земли. Подобное событие возможно как на химическом предприятии, так и при перевозке горючего или при взрыве газопровода. После выброса горючего в атмосферу развитие ситуации может пойти по четырем направлениям:

- 1) выброшенное горючее рассеивается без воспламенения;
- 2) во время выброса горючее загорается, при этом, как правило, инцидент завершается только пожаром без взрыва;

3) выброшенное горючее рассеивается на большой площади; после некоторой задержки облако загорается, и происходит обширный пожар;

4) последовательность событий такая же, как и в третьем случае, но после начала пожара пламя заметно ускоряется и образуется опасная взрывная волна.

Взрывы неограниченных паровых облаков могут быть чрезвычайно опасными. Это вызвано тем, что при большой утечке в атмосферу энергоносителя (природного газа, пропана и пр.) в определенных метеорологических условиях могут образоваться огромные облака горючей смеси. Примером таких взрывов является взрыв, происшедший на заводе «Нипро кемикл плант» около Фликсборо (Англия) в июне 1974 г. Как установлено, временно подсоединенная труба диаметром 0,5 м с двумя сильфонами вышла из строя, что вызвало выброс через два отверстия размером 0,7 м примерно 45 т циклогексана, находившегося при температуре 155 °С и давлении 850 кПа. Это горючее быстро испарилось и образовало большое облако. Зажигание произошло от печи водородного цеха, находившегося на некотором расстоянии от места утечки. Зажигание было «мягким», и вначале возник крупный пожар, а затем в результате ускорения пламени образовалась ударная волна, которая вызвала серьезные разрушения завода и домов на расстоянии до полутора километров. Погибли 28 человек и 89 были ранены. Ущерб заводу и окружающей территории оценивается в 100 млн долл.

Другим примером взрыва неограниченного облака паров на транспорте является авария в Ист-Сент-Луисе в январе 1972 г. Производилось формирование железнодорожного состава с использованием «горки». В этой операции вагоны освобождаются на вершине горки и переключением стрелок направляются к определенному составу. Вдоль пути имеются специальные тормоза, замедляющие движение вагона, как только он достигнет определенного места. Железнодорожная цистерна с пропиленом была направлена к формирующемуся составу. До нее в этом же направлении был пущен пустой хоппер (саморазгружающийся вагон). Хоппер не успел пройти полный путь и сцепиться с формирующимся составом. Тормозная система не замедлила достаточным образом ход цистерны с пропиленом, и она ударила хоппер на большой скорости. Хоппер был сброшен вверх и своим механизмом сцепки пробил отверстие в цистерне с пропиленом. Два вагона затем прошли путь около 500 м, при этом происходил разлив жидкого пропилена вдоль пути. Облако загорелось в служебном вагоне на некотором расстоянии от того

места, где остановились эти два вагона. Вслед за пожаром произошел мощный взрыв, в результате которого были ранены 176 человек и причинен ущерб в размере 7,6 млн долл.

Аналогичная техногенная катастрофа с выбросом горючих паров произошла в 2004 г. в Алжире, при этом погибли 30 человек.

2.2.5. Физические (паровые) взрывы

Физический (паровой) взрыв происходит, когда интенсивно перемешиваются две жидкости, имеющие различные температуры, или когда тонко размельченное горячее твердое вещество быстро перемешивается с намного более холодной жидкостью. Взрыв происходит не за счет химической реакции, а за счет того, что при скоротечном переходе жидкости в пар локально повышается давление. Подобные взрывы наблюдались в сталелитейной и алюминиевой промышленности, когда жидкий металл заливался во влажный контейнер. Взрывы также происходят, когда сжиженный природный газ попадает на воду. В этом случае холодной жидкостью является природный газ, а не вода. Имеются мнения специалистов, что катастрофические взрывы вулканов (таких, как взрывы Кракатау в 1883 г. и Суртсей в 1963 г.) также были физическими взрывами, когда морская вода перемешивалась непосредственно с раскаленной магмой. Некоторые примеры физических взрывов представлены в табл. 2.2.

Таблица 2.2. Примеры физических взрывов паров

Сферы взрывов	Горячая жидкость	Холодная жидкость
Ядерная технология SPERT, SL-1 BORAX-1 ¹⁾	Алюминий	Вода
Неядерная технология и природные взрывы		
Литейное производство	Сталь или шлак	Вода
Алюминиевая промышленность	Алюминий	Вода
Бумажная промышленность	Расплав Na_2CO_3 и Na_2S	Вода
Производство сниженного природного газа (СПГ)	Вода	СПГ
Морские извержения вулканов	Лава	Вода

На схеме рис. 2.1 приведены примеры взрывов, встречающихся на практике (примечание: ВВ — взрывчатые вещества).



Рис. 2.1. Схема взрывов (без учета комбинированных), наиболее часто встречающихся на практике

2.3. Характеристика ударных волн

Ударная волна представляет собой область резкого и сильного сжатия среды, распространяющейся во все стороны от центра взрыва со сверхзвуковой скоростью.

Ударные волны возникают при взрывах практически в любых средах и передают действие взрыва на значительное расстояние.

В зависимости от среды, в которой распространяется ударная волна, различают волны: воздушные (распространяются в воздушной среде); ударные (распространяются в водной среде); сейсмозрывные (распространяются в грунте).

2.3.1. Основные свойства и механизм образования ударных волн

Процесс образования ударной волны рассмотрим на примере взрыва заряда взрывчатого вещества (ВВ).

При взрыве заряда взрывчатого вещества газообразные продукты взрыва, находящиеся под давлением порядка десятков и даже сотен тысяч атмосфер, расширяются, сжимая окружающую среду (воздух, воду, грунт и т. п.). Развитие процесса взрыва в среде схематически показано на рис. 2.2. После прохождения детонационной волны AA_1 по заряду ВВ (пунктиром обозначена продетонировавшая часть заряда) начинается расширение продуктов детонации.

Зона расширяющихся продуктов в данный момент времени ограничена кривой CAA_1C_1 , фронт ударной волны, возбужденной взрывом, — BA и A_1B_1 . Скорость детонации U связана со скоростями ударной волны U_1 и расширения продуктов U_2 соотношением $U > U_1 > U_2$, причем значения U_1 и U_2 падают по мере удаления от фронта детонации AA_1 .

Волна сжатия, вызывающая заметный разогрев среды, может устойчиво существовать только в форме ударной волны со скачкообразным изменением давления во фронте; фронт с плавным нарастанием давления неустойчив и быстро превращается в скачкообразный с резким изменением давления. Вслед за ударной волной идет волна разреже-

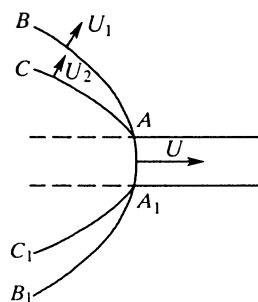


Рис. 2.2. Схема развития процесса взрыва в среде

ния, которая, двигаясь по сжатому и разогретому воздуху, будет нагонять фронт ударной волны.

Схема изменения давления во времени при прохождении ударной волны показана на рис. 2.3.

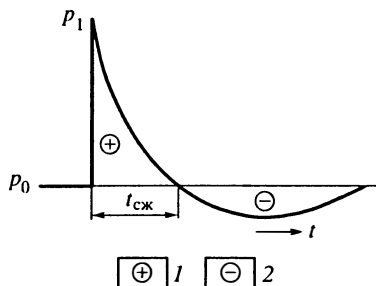


Рис. 2.3. Схема изменения давления во времени при прохождении ударной волны: 1 — фаза сжатия; 2 — фаза разрежения (при взрывах в плотных средах — фаза растяжения или разгрузки)

В момент прихода волны в определенную точку пространства давление в прилегающей к ней области скачком увеличивается от p_0 (в невозмущенной среде) до p_1 (во фронте ударной волны). За фронтом давление быстро падает и через время $t_{сж}$ (время действия фазы сжатия), после прихода волны в точку, оказывается меньше p_0 — фаза сжатия сменяется фазой разрежения.

Время, в течение которого давление в ударной волне сохраняется выше атмосферного, называется фазой сжатия, а время, в течение которого давление остается ниже атмосферного, — фазой разрежения.

В момент прихода ударной волны в некоторую точку среда, прилегающая к этой точке, начинает двигаться со скоростью u в направлении распространения этой волны. Характер изменения $u(t)$ схож с характером изменения $p(t)$. В фазе сжатия среда движется в сторону перемещения ударной волны, в фазе разрежения — в обратном направлении, но с несколько меньшей скоростью.

Фронт ударной волны распространяется со сверхзвуковой скоростью ($V > c_0$), а ее хвостовая часть, где $p < -p_0$, движется со скоростью, близкой к скорости звука c_0 в невозмущенной среде, поэтому по мере движения ударная волна растягивается во времени. Давление во фронте ударной волны p_1 , скорость перемещения фронта V и скорость потока среды u не являются постоянными. При удалении ударной волны от очага взрыва она уменьшается, и на больших расстоя-

ниях V приближается к c_0 , а u — к нулю, т. е. ударная волна вырождается в акустическую (упругую) волну. Следовательно, ударная волна имеет как область сжатия, так и разрежения. На практике действие ударной волны определяется фазой сжатия. Действие фазы разрежения обычно несущественно, поэтому не учитывается, за исключением некоторых частных эффектов.

2.3.2. Параметры ударной волны

Основными параметрами ударной волны являются:

- избыточное давление во фронте ударной волны;
- скоростной напор ударной волны, действующий на поверхность объекта;
- время действия ударной волны;
- импульс волны и др.

Избыточное давление во фронте ударной волны характеризуется разностью давления во фронте волны и атмосферного давления.

$$\Delta p = p_1 - p_0,$$

где p_1 — давление во фронте ударной волны;

p_0 — давление в невозмущенной среде (атмосферное давление).

Ударная волна характеризуется скоростью нарастания давления до его максимального значения.

Под **максимальным давлением взрыва** понимается наибольшее давление, которое возникает при дефлаграционном сгорании наиболее взрывоопасной газо-, паро-, пылевоздушной смеси в замкнутом сосуде при начальном давлении 101,3 кПа. Максимальное давление при взрыве аэросмеси можно рассчитать по формуле:

$$p_{\max} = p_0 T_{\Gamma} n_{\kappa} / T_0 n_{\Pi}, \quad (2.1)$$

где p_0 — начальное давление, при котором находится аэрозвесь, кПа;

T_0 — начальная температура исходной смеси, К;

T_{Γ} — адиабатическая температура горения стехиометрической смеси с воздухом при постоянном объеме, К;

n_{κ} — число молей газообразных продуктов сгорания;

n_{Π} — число молей исходной газовой смеси.

Ударная волна характеризуется **пиком**. **Пик** — это участок ударной волны от момента ударного сжатия до завершения химической реакции, где формируется самое высокое давление.

Параметром ударной волны является *импульс волны*. Величина импульса волны будет различной в зависимости от среды, в которой протекает взрыв. В общем виде импульс волны описывается *законом подобия*:

$$I = \sqrt[3]{G} \varphi \left(\frac{\sqrt[3]{G}}{R} \right), \quad (2.2)$$

где G — масса взрывчатого (горючего) вещества;

R — расстояние действия ударной волны;

φ — угол отражения волны.

Распространение ударной волны зависит от множества факторов, определяющих ее действие и силу.

Для оценки действия ударной волны необходимо знать характер нагрузки и параметры системы, на которую эта нагрузка действует. Характер нагрузки обычно описывается функцией изменения давления ударной волны во времени $p(t)$ в пределах от нуля до времени фазы сжатия $t_{сж}$. Однако во многих частных случаях действие ударной волны с достаточной точностью определяется либо значением избыточного давления $\Delta p_1 = p_1 - p_0$ на ее фронте, либо величиной удельного импульса фазы сжатия:

$$I = \int_0^{t_{сж}} \Delta p(t) dt. \quad (2.3)$$

Характер воздействия ударной волны на заданную систему зависит от соотношения между временем действия фазы сжатия $t_{сж}$ и временем релаксации системы τ , а для упругих систем — периодом колебаний T .

Если $t_{сж} \gg \tau$, то действие ударной волны определяется величиной избыточного давления на ее фронте, так как в этом случае система будет деформирована за такой промежуток времени (порядка $(1/4 - 1/3)\tau$), в течение которого давление во фронте не успеет существенно упасть. Если, напротив, $t_{сж} \ll \tau$, то давление за фронтом волны снижается за столь малый промежуток времени, что система практически не успевает деформироваться и дальнейшие деформации ее определяются приобретенным ею количеством движения, а следовательно, удельным импульсом ударной волны.

Время фазы сжатия зависит от множества факторов: размеров и формы заряда ВВ, среды, в которой протекает взрыв, природы взрыв-

чатого вещества, энергии взрыва и др. Время действия фазы сжатия $t_{\text{сж}}$ при использовании соответствующих форм законов подобия выразится формулами (2.4).

$$\begin{cases} t_{\text{сж}} = r_0 F_1 \left(\frac{r_0}{R} \right); \\ t_{\text{сж}} = \sqrt[3]{G} F_2 \left(\frac{\sqrt[3]{G}}{R} \right); \\ t_{\text{сж}} = \sqrt[3]{E} F_3 \left(\frac{E}{R} \right). \end{cases} \quad (2.4)$$

где r_0 — радиус заряда;

G — масса заряда;

R — расстояние действия ударной волны;

E — энергия взрыва;

F_1, F_2, F_3 — функциональная зависимость.

Огромное значение для оценки параметров ударных волн и их действия имеет закон подобия при взрывах, позволяющий сравнивать характеристики ударных волн, возбужденных взрывами зарядов различной массы, состоящих из разных ВВ, а также взрывами, вызванными горением взрывоопасных смесей.

Детонационное горение возникает во взрывоопасной среде при прохождении по ней достаточно сильной ударной волны (или волны ударного сжатия). Например, если в замкнутом объеме с горючей газовой смесью взорван точечный заряд взрывчатого вещества, либо произошло возгорание от источника зажигания, то по всей газовой смеси от точки расположения заряда распространится ударная волна, в которой происходит внезапное скачкообразное повышение параметров состояния газовой смеси — давления, температуры, плотности. Повышение температуры газа при сжатии в ударной волне значительно больше, чем при аналогичном адиабатическом сжатии. Поэтому *абсолютная температура газа, сжатого ударной волной, пропорциональна давлению ударной волны.*

Следовательно, *если ударная волна достаточно сильна, то температура газа под действием ударной волны может повыситься до температуры самовоспламенения.*

Ударная волна характеризуется *скоростным напором*. Скоростной напор образуется в результате торможения о какую-либо преграду движущихся масс воздуха в ударной волне. Скорость движения рас-

ширяющихся газов, образующих скоростной напор, зависит от степени сжатия газов и нагревания их ударной волной. Напор вызывает опрокидывание и отбрасывание различных объектов на значительные расстояния.

Ударная волна распространяется в пространстве со сверхзвуковой скоростью. Например, ударная волна при ядерном взрыве проходит первые 1000 м за 2 с, 2000 м — за 5 с, 3000 м — за 8 с.

Сила ударной волны очень велика и приводит к значительным разрушениям. Если скорость повышения давления относительно невелика, то прежде всего будут разрушаться наименее прочные детали, например, окна и двери. В случае же однородной по прочности конструкции здания подъем крыши и разрушение всех стен произойдут одновременно. Избыточное давление ударной волны приводит при взрыве к сильным повреждениям. В табл. 2.3 содержатся данные, указывающие на степень повреждений.

Таблица 2.3. Повреждения при взрыве от ударной волны

Давление в ударной волне p_s , кПа	Степень повреждения
0,2	Разрушение стекол в окнах при больших площадях остекления
0,3—0,5	Громкий звук (143 дБ); повреждения стекол; 5%-ное разрушение остекления
2,1	Повреждение обшивки домов; разрушение до 10 % оконных стекол
2,8	Незначительные повреждения конструкций
4,0	90%-ное разрушение остекления, повреждение оконных рам
5,0	Незначительные повреждения конструкций домов
7,2	Частичное разрушение домов до состояния, при котором проживание в них невозможно
8,5	Разрушение гофрированного асбеста. Гофрированные стальные или алюминиевые панели ослабляются в крепи и подвергаются изгибу. Деревянные панели разрушаются
9,2	Стальные конструкции зданий искривляются
14,2	Частичное разрушение стен и кровли домов

Окончание табл. 2.3

Давление в ударной волне p_s , кПа	Степень повреждения
14,2—21,4	Разрушаются не укрепленные стены из бетона и шлаковых блоков
16,4	Нижний предел серьезных повреждений конструкций
17,8	50%-ное разрушение
21,4	Тяжелые машины (весом 1,35 т) в промышленных зданиях подвергаются небольшим повреждениям. Стальные конструкции изгибаются
21 —28,5	Разрушение бескаркасных сооружений, склепанных из стальных панелей. Разрушение масляных хранилищ
28,5	Отрыв покрытий легких промышленных зданий
35,6	Растрескивание деревянных столбов (телеграфных и пр.). Повреждаются высокие гидравлические прессы (весом 1,8 т)
35,6—49,9	Почти полное разрушение домов
49,9	Перевертывание тяжелогруженных ж/д вагонов
49,9—57,0	Кирпичные стены толщиной 200—300 мм, не укрепленные, теряют прочность в результате сдвига или изгиба
64,1	Тяжелые грузовые железнодорожные вагоны полностью разрушаются
70,0	Разрушение более 75 % внутренней кирпичной кладки зданий
71,2	Возможно общее разрушение зданий. Тяжелые (>3 т) машины и станки передвигаются и сильно повреждаются. Очень тяжелые (>5 т) машины и станки сохраняются
2137,0	Разрушение с образованием кратера

Ударная волна с $p_s = 19$ кПа вызывает значительные разрушения городских построек, а при $p_s = 98$ кПа наступает полное разрушение зданий и гибель живых организмов.

На степень разрушения влияют особенности конструкции сооружений, а также рельеф местности.

Ударная волна вызывает поражения людей, которые подразделяются на четыре степени;

- первая степень — легкие поражения (избыточное давление $\Delta p = 0,2-0,4$ кгс/см²);
- вторая степень — поражение средней тяжести ($\Delta p = 0,5$ кгс/см²). Наблюдается поражение органов, кровотечение изо рта, ушей, носа, а также разрывы связок, переломы костей;
- третья степень — тяжелые поражения ($\Delta p > 0,5$ кгс/см²). Наблюдаются все признаки поражения, характерные для второй степени, но в более выраженной форме;
- четвертая степень — крайне тяжелое поражение ($\Delta p = 1$ кгс/см²). Наблюдается резкое нарушение жизненно важных функций организма, сопровождающееся потерей сознания, расстройством кровообращения и дыхания. Такое поражение заканчивается летальным исходом.

2.4. Параметры взрыва в замкнутом объеме

Одним из основных свойств горения газообразных смесей является самопроизвольное распространение волны химической реакции в результате передачи теплоты и диффузии активных центров. Активные центры представляют собой промежуточные продукты реакции в виде свободных атомов и радикалов, которые обладают высокой реакционной способностью. Активность этих центров усиливается, если происходит взрыв в замкнутом объеме.

Рассмотрим изменение давления при взрыве в закрытом технологическом аппарате (рис. 2.4).

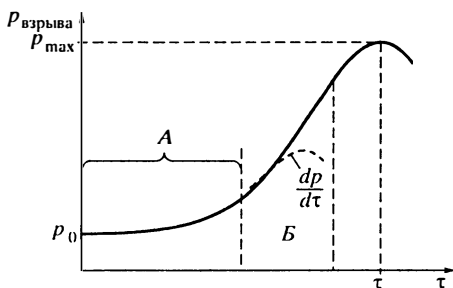


Рис. 2.4. Изменение давления в закрытом технологическом аппарате при взрыве

Основными параметрами, характеризующими процесс взрыва в замкнутом объеме газо-, паровоздушных смесей являются:

- максимальное давление взрыва;
- скорость нарастания взрыва;
- температура взрыва;
- время достижения максимального давления взрыва.

В зоне *A* происходят интенсивный подогрев горючей смеси, диффузия активных центров и протекание химической реакции. Эта зона характеризуется распространением фронта пламени по горючей газо-, паровоздушной смеси. Фронт пламени часто рассматривают как поверхность, разделяющую холодную горючую смесь и горячие продукты сгорания.

Скорость перемещения фронта пламени по горючей смеси определяет интенсивность процесса горения и является его важнейшей характеристикой.

Установлено, что на единице поверхности фронта пламени в единицу времени сгорает одно и то же количество горючей смеси. Распространение невозмущенного пламени произвольной формы происходит в каждой точке фронта по нормали к его поверхности. Скорость перемещения пламени называется нормальной скоростью пламени и является постоянной величиной, характеризующей горение какого-либо газа.

В зоне *B* наблюдается резкое изменение давления до p_{\max} за счет образования большого количества газообразных продуктов в результате химической реакции. При достижении максимального давления возникает взрыв, причем $p_{\text{взрыва}} > p_{\max}$.

2.5. Тепловое действие взрыва

Тепловое воздействие при взрыве оказывает сильное поражающее действие. Взрывы ракетных топлив или химических продуктов, разрывы сосудов с последующим взрывом облака паров в ограниченном или открытом объеме, горение жидкостей в открытых резервуарах, детонация бризантных ВВ и ядерные взрывы — все эти явления могут привести к образованию *огненного шара*.

При взрыве газовых емкостей с последующим горением выходящих в атмосферу продуктов образующийся огненный шар увеличивает разрушающее действие взрыва на оборудование и предметы. По-

следствия действия такого огненного шара, в случае взрывов емкостей с перегретой горючей жидкостью очень серьезны. Наличие большой массы жидкости в момент взрыва и характер ее распространения вне емкости определяют продолжительность горения и размер образовавшегося огненного шара. Наиболее опасные взрывы чаще всего происходят на железнодорожном транспорте. Примером являются аварии с железнодорожными цистернами (описание одной из которых см. на с. 183). Огненный шар, образовавшийся от одной из потерпевших аварию железнодорожных цистерн в США вместимостью 88 м^3 , охватил участок поверхности земли радиусом 60 м и воспламенил горючие материалы в радиусе 350 м.

Огненный шар, возникший 21.06.1970 г. (штат Иллинойс, США) в результате взрыва автоцистерны, вмещавшей 120 м^3 сжиженного газа, имел диаметр 180 м при разливе горючего в количестве 68 т.

Облако пара, образовавшееся при разливе горючего и смешанное с воздухом в соотношении выше верхнего концентрационного предела воспламенения, не способно к объемному взрыву. Оно может начать гореть вокруг своей внешней оболочки, вытягиваясь и образуя огненный шар. Эмпирические формулы, предсказывающие ориентировочно размер и время существования такого огненного шара, имеют следующий вид:

$$d_s = 55 \sqrt[3]{m_y}, \quad (2.5)$$

где d_s — диаметр огненного шара, м;

m_y — масса углеводородов формулы $C_n H_{2n}$, т.

$$\tau_s = 3,8 \sqrt[3]{m_y}, \quad (2.6)$$

где τ_s — время существования огненного шара, с.

Действие теплового излучения зависит не только от энергии выброса, но и от скорости, с которой происходит выброс, т. е. от его мощности. Если энергия выброса — линейная функция m , а время, в течение которого происходил выброс, — функция $m^{1/3}$ согласно (2.6), то мощность, выделившаяся при сгорании огненного шара ($P_{\text{ош}}$, Вт), составит

$$P_{\text{ош}} = \frac{Q_y m_y}{\tau_s}, \quad (2.7)$$

где Q_y — теплота горения углеводорода, принимаем ее равной $47 \cdot 10^9$ Дж.

Отсюда

$$P_{\text{ош}} = \frac{47 \cdot 10^9 \cdot m_y}{3,8 \cdot m_y^{1/3}} = 12,4 \cdot 10^9 \cdot m_y^{2/3}, \text{ Вт.}$$

Для большинства горючих веществ образованный при их горении огненный шар очень быстро достигает максимального размера, мало изменяясь затем в течение длительного времени. Поэтому если не учитывать нестационарную стадию формирования огненного шара, то характеризующие его параметры могут быть представлены в виде следующих соотношений:

$$\frac{T^{1/3} d_s}{Q^{1/3}} = A_1; \quad (2.8)$$

$$\frac{T^{10/3} \tau_s}{Q^{1/3}} = A_2; \quad (2.9)$$

$$\frac{T^{10/3} \tau_s}{m^{1/3}} = A_3, \quad (2.10)$$

где T — температура огненного шара;

τ_s — время существования огненного шара;

Q — полное энергосодержание горючего вещества;

m — полная масса горючего вещества;

A_1, A_2, A_3 — постоянные коэффициенты.

Температура T , входящая в приведенные соотношения, определяется в основном типом вещества. Ракетные топлива при горении создают температуру около 2500 К, тогда как при взрывах ВВ температура ближе к 5000 К, а горючие газы создают температуру около 1350 К.

Уравнение (2.8) означает, что при равных массах и энергосодержании как взрывчатое вещество (ВВ), так и ракетное топливо, отличающееся в два раза по абсолютной температуре, создадут огненные шары, которые будут различаться по диаметру лишь на 26 %. При этом из уравнения (2.9) следует, что вследствие большого показателя степени при температуре (равного 10/3) ожоговое действие более холодного огненного шара, образовавшегося при взрыве ракетного топлива, будет в 10 раз более продолжительным, чем в случае ВВ равной

массы. Физически это объясняется тем, что более горячий объект быстрее излучает свою энергию по сравнению с более холодным.

Для определения максимального диаметра (d_s , м) и времени жизни огненного шара (τ_s , с) рекомендуются также следующие эмпирические формулы:

$$d_s = 3,86 m^{0,320}, \quad (2.11)$$

$$\tau_s = 0,299 m^{0,320}, \quad (2.12)$$

$$\tau_s = 1,07 m^{0,181}, \quad (2.13)$$

где m — масса горючего, кг.

Формулы (2.11) и (2.12) рекомендуются к использованию для больших масс горючего и если при их горении температура достигает примерно 3600 К. Формула (2.13) применяется лишь в тех случаях, когда масса горючего вещества не превышает 10 кг.

Пример расчета по этим формулам с использованием закона подобия, выраженного формулами (2.8)—(2.10), приводится в практических работах раздела 3.

Для оценки теплового излучения огненного шара на различных расстояниях используются зависимости, графически представленные на рис. 2.5. Их можно применять при анализе взрыва перегретой легкокипящей горючей жидкости или любого другого сильного взрыва.

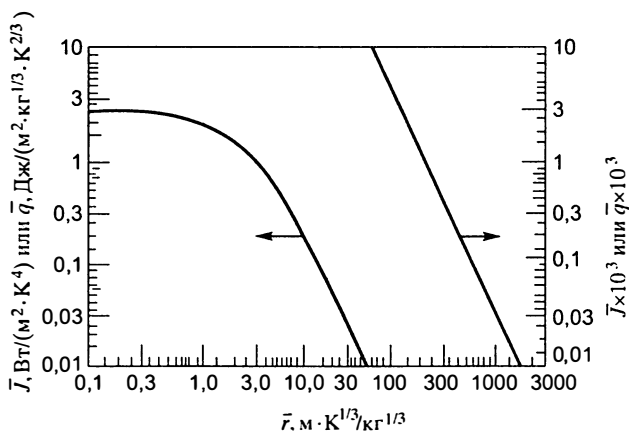


Рис. 2.5. Зависимость приведенной интенсивности теплового потока $\bar{J} = (J/T^4) \cdot 10^7$ и приведенной его энергии $\bar{q} = (q/m^{1/3}T^{2/3}) \cdot 1,18 \cdot 10^{-4}$ от приведенного расстояния $\bar{r} = r T^{1/3}/m^{1/3}$. Для удобства кривая разбита на две части, соответствующие разным областям

Тепловая излучательная мощность огненного шара, образованного горящими парами углеводородов, определяется из зависимости:

$$P_{и} = 12,4 \cdot 10^9 \cdot m_y^{2/3} \cdot 0,3 = 3,72 \cdot 10^9 \cdot m_y^{2/3}, \text{ Вт}, \quad (2.14)$$

где 0,3 — доля энергии теплового излучения в общем энерговыделении.

За время существования огненного шара облучаемая им единичная поверхность будет получать энергию q_r , которую можно вычислить из следующих выражений:

$$q_r = \frac{0,3 \cdot Q_y \cdot m_y}{4\pi r^2}, \quad (2.15)$$

$$q_r = \frac{0,3 \cdot 47 \cdot 10^9 \cdot m_y}{4\pi r^2} = 1,123 \cdot 10^9 \frac{m_y}{r^2}, \text{ Дж/м}^2.$$

Отсюда получаем выражение для r_s :

$$r_s = \left(1,123 \cdot 10^9 \cdot \frac{m_y}{q_r} \right)^{0,5} = 3,35 \cdot 10^4 \cdot m_y^{0,5} \cdot q_r^{-0,5}, \text{ м} \quad (2.16)$$

где r_s — радиус огненного шара, м.

Интенсивность энергии (J_r) у облучаемой поверхности определяется из выражений

$$J_r = \frac{P_{и}}{4\pi r^2}, \quad (2.17)$$

$$J_r = \frac{3,72 \cdot 10^9 \cdot m_y^{2/3}}{4 \cdot 3,14 \cdot r^2} = 2,96 \cdot 10^8 \cdot m_y^{2/3} \cdot r^{-2}, \text{ Вт/м}^2.$$

Отсюда

$$r_s = 1,72 \cdot 10^4 \cdot m_y^{2/3} \cdot J_r^{-1/2} \text{ м.}$$

Тепловое излучение ослабляется атмосферой, причем не одинаково в разных местах в течение суток и даже часа. Эффект ослабления предлагается учитывать коэффициентом (λ) по следующей формуле

$$\lambda = 0,96 - 0,12 \lg r_s. \quad (2.18)$$

Формула (2.18) учитывает ослабление теплового излучения с расстоянием при относительной влажности воздуха 50 %. С повышением влажности эффект ослабления увеличивается.

Для огненных шаров с коротким временем жизни вид зависимости, в которой учитываются интенсивность энергии (J_r) и время его действия (τ_s), не имеет значения, а существенна лишь полная энергия (q_r), сообщенная объекту. При больших временах теплового воздействия, превышающих время, необходимое для достижения равновесия, порог поражения определяется исключительно величиной J_r .

Существует пороговый уровень интенсивности излучения, ниже которого, независимо от длительности воздействия, поражение равно нулю. Таким безопасным пределом является интенсивность излучения $5 \text{ МДж}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$. С увеличением интенсивности теплоизлучения возможное время пребывания человека в зоне излучения уменьшается.

На рис. 2.6 приведена J_r — τ_s -диаграмма, разделяющая области терпимой и нестерпимой боли (критерий, близкий к понятию ожога второй степени). Две линии на графике обусловлены разбросом данных вследствие индивидуальных различий.

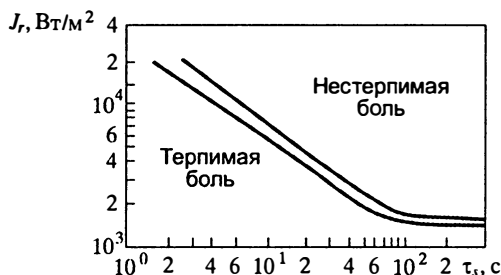


Рис. 2.6. Болевой порог при лучистом ожоге незащищенной кожи. На область между двумя изображенными кривыми приходится до 50 % наблюдений

Для малых экспозиций, меньших 10^{-4} с , поражение глаз наблюдается при $q_r = 1,7 \text{ кДж}/\text{м}^2$. Кожный покров человека способен выдерживать (без появления болевых ощущений) интенсивность излучения $J_r = 2,1 \cdot 10^4 \text{ Вт}/\text{м}^2$ в течение 2 с, т. е. $q_r = 4,2 \cdot 10^4 \text{ Дж}/\text{м}^2$. Не действует на кожный покров отрицательно температура $42 \text{ }^\circ\text{C}$. Боль начинает ощущаться при температуре кожи $44 \text{ }^\circ\text{C}$.

Соприкосновение в течение 10 с с водой, имеющей температуру $60 \text{ }^\circ\text{C}$, приводит к частичной утрате кожного покрова, а при температуре $70 \text{ }^\circ\text{C}$ в течение 10 с вызывает полную потерю кожного покрова.

Определение порогового расстояния, на котором возникают ожоги открытых участков кожи, может производиться с помощью зависимостей, приведенных на рис. 2.5 и 2.6.

На рис. 2.7 приводятся радиусы теплового поражения от огненного шара в зависимости от образовавшей его массы пропана (предполагаются на поверхности шара адиабатические температуры и не учтено ослабляющее влияние атмосферы).



Рис. 2.7. Радиусы теплового поражения от огненного шара, образованного пропаном, в зависимости от его массы

Вероятность поражения человека определяется индексом дозы облучения (табл. 2.4):

а) смертельного

$$\text{индекс дозы} = (J_r)^{4/3} \cdot \tau_s, \text{ Дж/м}^2, \quad (2.19)$$

б) ожогом третьей степени

$$\text{индекс дозы} = (J_r)^{1.15} \cdot \tau_s = 5,5 \cdot 10^5, \text{ Дж/м}^2, \quad (2.20)$$

где τ_s — время существования огненного шара, с.

Отмечаем, что указанные вычисления интенсивности излучения на определенном расстоянии от определенной массы вещества в огненном шаре являются достаточно точными. Имеющиеся несовпаде-

Таблица 2.4. Вероятность смертельного поражения в зависимости от полученной дозы

Вероятность получения смертельного поражения	Индекс дозы = $(J_r)^{4/3} \cdot \tau_s$, Дж/м ²
0,01	$1,00 \cdot 10^7$
0,50	$2,30 \cdot 10^7$
0,99	$6,50 \cdot 10^7$

ния, приводящие к уменьшению расчетных величин по крайней мере в два раза, являются результатом:

- 1) появления значительных ошибок при предсказании доли разлития жидкости, образующей огненный шар;
- 2) трехмерности фигуры, на которую попадает излучение. Например, человек — это неподвижная плоская поверхность, ориентированная на 90° к направлению излучения;
- 3) подхода к вопросу, основанного на опытах с ядерным оружием.

Применительно к тепловым импульсам от огненных шаров с длительностью 10—20 с (характерно для огненных шаров, образованных углеводородами) человек, если успеет полностью отвернуться, то получит ожоги более низкой интенсивности, но распределенные по большей площади тела.

Пример. Огненный шар, образовавшийся в результате сгорания около 10 т пропана при аварии 9 марта 1972 г. в Линчберге (США), имел радиус, примерно равный 60 м. На расстоянии 90 м привел к гибели одного человека. И на расстоянии 140 м вызвал тяжелые ожоги у трех очевидцев случившегося. Один смертельный случай зарегистрирован на расстоянии 130 м. На этом же расстоянии были поражены еще два человека, но не смертельно.

Итак, огненный шар, образовавшийся в результате сгорания горючих газов, паровоздушных смесей имеет сильное поражающее воздействие на человека и техносферу.

Раздел 3

ПРОГНОЗНАЯ ОЦЕНКА ПОСЛЕДСТВИЙ ВЗРЫВА

Для прогнозной оценки параметров и последствий взрыва используют различные методики, которые применяют в зависимости от места расположения взрывоопасного оборудования.

Возникновению и развитию процессов при взрыве могут способствовать различные параметры: избыточное давление, стехиометрическое равновесие горючей смеси, количество и интенсивность паров, поступающих в зону горения.

Для оценки последствий взрыва необходимо производить расчеты этих параметров взрыва. Рассчитывают следующие параметры при горении и взрыве горючих веществ:

1) массу горючих веществ, поступивших в окружающее пространство;

2) горизонтальные размеры зон, ограничивающих газо- и паровоздушные смеси с концентрацией горючего выше НКПР, при аварийном поступлении горючих газов и паров не нагретых легковоспламеняющихся жидкостей в открытое пространство;

3) избыточное давление и импульс волны давления при сгорании смесей горючих газов и паров с воздухом в открытом пространстве;

5) критерии пожарной опасности для горючей пыли.

Методики расчета параметров взрыва в помещении и в открытом пространстве позволяют оценивать возможность разрушения зданий, сооружений и технологического оборудования при взрыве.

3.1. Методика расчета избыточного давления взрыва горючих газов, паров ЛВЗ и ГЖ в производственном помещении

Избыточное давление Δp взрыва для индивидуальных горючих веществ, состоящих из атомов С, Н, О, N, Cl, Вг, I, F, определяется по формуле:

$$\Delta p = (p_{\max} - p_0) \cdot \frac{m \cdot Z}{V_{\text{св}} \cdot \rho_{\text{г.п}} \cdot \Phi_{\text{сх}} \cdot K_{\text{н}}}, \quad (3.1)$$

где p_{\max} — максимальное давление взрыва стехиометрической газозвушной или паровоздушной смеси в замкнутом объеме, определяемое экспериментально или по справочным данным. При отсутствии данных допускается принимать p_{\max} равным 900 кПа;

p_0 — начальное давление, кПа (допускается принимать равным 101 кПа);

m — масса паров легковоспламеняющихся (ЛВЖ) и горючих жидкостей (ГЖ), вышедших в результате расчетной аварии в помещении, кг;

Z — коэффициент участия горючего во взрыве, который может быть рассчитан на основе характера распределения газов и паров в объеме помещения согласно табл. 3.1.

$V_{\text{св}}$ — свободный объем помещения, м³ (допускается принимать равным 80 % от геометрического объема помещения);

Таблица 3.1. Значения коэффициента участия горючего вещества, Z

Вид горючего вещества	Значение Z
Водород	1,0
Горючие газы (кроме водорода)	0,5
Легковоспламеняющиеся и горючие жидкости, нагретые до температуры вспышки и выше	0,3
Легковоспламеняющиеся и горючие жидкости, нагретые ниже температуры вспышки, при наличии возможности образования аэрозоля	0,3
Легковоспламеняющиеся и горючие жидкости, нагретые ниже температуры вспышки, при отсутствии возможности образования аэрозоля	0

$\rho_{г.п}$ — плотность газа или пара при расчетной температуре, кг · м⁻³;

$\varphi_{сх}$ — стехиометрическая концентрация паров ЛВЖ, % об.;

K_H — коэффициент, учитывающий негерметичность помещения и неадиабатичность процесса горения. Допускается принимать K_H равным трем.

Плотность газа (пара)

Плотность газа или пара при расчетной температуре t_p , вычисляют по формуле:

$$\rho_{г(п)} = \frac{M}{V_0(1 + 0,00367 \cdot t_p)}, \quad (3.2)$$

где M — молярная масса, кг · кмоль⁻¹;

V_0 — мольный объем, равный 22,413 м³ · кмоль⁻¹;

t_p — расчетная температура, °С.

В качестве расчетной температуры следует принимать максимально возможную температуру воздуха в данном помещении в соответствующей климатической зоне или максимально возможную температуру воздуха по технологическому регламенту с учетом возможного повышения температуры в аварийной ситуации. Если такого значения расчетной температуры t_p по каким-либо причинам определить не удастся, допускается принимать ее равной 61 °С.

Стехиометрическая концентрация

Стехиометрическую концентрацию горючих газов (ГГ) или паров ЛВЖ и ГЖ вычисляют по уравнению:

$$\varphi_{сх} = \frac{100}{1 + 4,84\beta}, \quad (3.3)$$

где β — стехиометрический коэффициент кислорода в реакции сгорания, который определяют как

$$\beta = n_C + \frac{n_H - n_X}{4} - \frac{n_O}{2}, \quad (3.4)$$

где n_C , n_H , n_O , n_X — число атомов С, Н, О и галоидов в молекуле горючего.

Расчет Δp для других индивидуальных веществ, кроме упомянутых выше, а также для смесей может быть выполнен по формуле

$$\Delta p = \frac{m \cdot H_T \cdot \rho_o \cdot Z}{V_{св} \cdot \rho_v \cdot C_p \cdot T_0} \cdot \frac{1}{K_n}, \quad (3.5)$$

где H_T — теплота горения, Дж · кг⁻¹;

ρ_v — плотность воздуха до взрыва при начальной температуре T_0 , кг · м⁻³;

C_p — теплоемкость воздуха, Дж · кг⁻¹ · К⁻¹ (допускается принимать равной $1,01 \cdot 10^3$ Дж · кг⁻¹ · К⁻¹);

ρ_o — начальное давление, кПа (допускается принимать 101 кПа);

m — масса горючих веществ, вышедших в помещение в результате аварии, кг;

Z — коэффициент участия горючего во взрыве, который может быть рассчитан на основе характера распределения газов и паров в объеме помещения согласно табл. 3.1;

$V_{св}$ — свободный объем помещения, м³ (допускается принимать равным 80 % от геометрического объема помещения);

K_n — коэффициент, учитывающий негерметичность помещения и не адиабатичность процесса горения. Допускается принимать K_n равным трем.

T_0 — начальная температура воздуха, К.

Масса горючего газа

Масса горючего газа, поступившего в помещение при расчетной аварии, определяется по формуле

$$m = (V_a + V_T) \rho_r, \quad (3.6)$$

где V_a — объем газа, вышедшего из аппарата, м³;

V_T — объем газа, вышедшего из трубопроводов, м³.

ρ_r — плотность горючего газа, кг · м⁻³.

При этом

$$V_a = 0,01 p_1 V, \quad (3.7)$$

где p_1 — давление в аппарате, кПа;

V — объем аппарата, м³;

$$V_T = V_{1T} + V_{2T}, \quad (3.8)$$

где V_{1T} — объем газа, вышедшего из трубопровода до его отключения, м^3 ;

V_{2T} — объем газа, вышедшего из трубопровода после его отключения, м^3 ;

$$V_{1T} = qT, \quad (3.9)$$

где q — расход газа, определяемый в соответствии с технологическим регламентом в зависимости от давления в трубопроводе, его диаметра, температуры газовой среды и т. д., $\text{м}^3 \cdot \text{с}^{-1}$;

T — время до отключения трубопровода, с.

$$V_{2T} = 0,01 \pi p_2 (r_1^2 L_1 + r_2^2 L_2 + \dots + r_n^2 L_n), \quad (3.10)$$

где p_2 — максимальное давление в трубопроводе по технологическому регламенту, кПа;

r — внутренний радиус трубопроводов, м;

L — длина трубопроводов от аварийного аппарата до задвижек, м.

Масса паров жидкости

Масса паров жидкости, поступивших в помещение при наличии нескольких источников испарения (поверхность разлитой жидкости, поверхность со свеженанесенным составом, открытые емкости и т. п.), определяется из выражения:

$$m = m_p + m_{\text{емк}} + m_{\text{св.окр}}, \quad (3.11)$$

где m_p — масса жидкости, испарившейся с поверхности разлива, кг;

$m_{\text{емк}}$ — масса жидкости, испарившейся с поверхностей открытых емкостей, кг;

$m_{\text{св.окр}}$ — масса жидкости, испарившейся с поверхностей, на которые нанесен применяемый состав, кг.

При этом каждое из слагаемых в формуле (3.11) определяется по формуле

$$m = W \cdot F_{\text{н}} \cdot \tau, \quad (3.12)$$

где m — масса испарившейся жидкости, кг;

W — интенсивность испарения, $\text{кг} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{м}^{-2}$;

$F_{\text{н}}$ — площадь испарения, м^2 .

τ — время испарения, с.

Интенсивность испарения паров

Интенсивность испарения W определяется по справочным и экспериментальным данным. Для не нагретых выше температуры окружающей среды ЛВЖ (при отсутствии данных) допускается рассчитывать W по формуле

$$W = 10^{-6} \cdot \eta \cdot \sqrt{M} \cdot p_n, \quad (3.13)$$

где η — коэффициент, принимаемый по табл. 3.2 в зависимости от скорости и температуры воздушного потока над поверхностью испарения;

M — молярная масса, кг · кмоль⁻¹;

p_n — давление насыщенного пара при расчетной температуре жидкости t_p .

Таблица 3.2. Значение коэффициента η

Скорость воздушного потока в помещении, м · с ⁻¹	Значение коэффициента η при температуре t , °С, воздуха в помещении				
	10	15	20	30	35
0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
0,1	3,0	2,6	2,4	1,8	1,6
0,2	4,6	3,8	3,5	2,4	2,3
0,5	6,6	5,7	5,4	3,6	3,2
1,0	10,0	8,7	7,7	5,6	4,6

Если аварийная ситуация связана с возможным поступлением жидкости в распыленном состоянии, то она должна быть учтена введением дополнительного слагаемого, учитывающего общую массу поступившей жидкости от распыляющих устройств, исходя из продолжительности их работ.

В случае наличия в помещении горючих газов, легковоспламеняющихся или горючих жидкостей при определении значения массы горючих паров или газов допускается учитывать работу аварийной вентиляции. Она должна быть обеспечена резервными вентиляторами, автоматическим пуском, если имеется превышение предельно допустимой взрывобезопасной концентрации и электроснабжение по первой категории надежности. Устройства для удаления воздуха из помещения должны быть расположены в непосредственной близости от места возможной аварии.

В этом случае определяют массу аккумулированных паров ЛВЖ, ГЖ или горючих газов по формуле

$$m_{\text{п}}^* = \frac{m_{\text{п}}}{1 + \frac{A_{\text{в}} \cdot \tau}{3600}}, \quad (3.14)$$

где $m_{\text{п}}^*$ — масса аккумулированных паров ЛВЖ, ГЖ или ГГ, кг;

$m_{\text{п}}$ — масса испарившихся паров ЛВЖ, ГЖ или вышедших ГГ, кг;

τ — продолжительность поступления ГГ и паров ЛВЖ и ГЖ в объем помещения, с.

3.2. Методика расчета избыточного давления взрыва горючей пыли в производственном помещении

Расчет избыточного давления взрыва Δp , кПа, производится по (3.5), в которой коэффициент участия взвешенной пыли во взрыве (Z) рассчитывается:

$$Z = 0,5F, \quad (3.15)$$

где F — массовая доля частиц пыли размером менее критического, с превышением которого взрывобезопасность становится взрывобезопасной, т. е. неспособной распространять пламя. В отсутствие возможности получения сведений для расчета величины допускается принимать $Z = 0,5$.

Масса взвешенной пыли

Расчетная масса взвешенной в объеме помещения пыли m (кг), образовавшейся в результате аварийной ситуации, определяется по формуле

$$m = m_{\text{вз}} + m_{\text{ав}}, \quad (3.16)$$

где $m_{\text{вз}}$ — расчетная масса взвешенной пыли в воздухе, кг;

$m_{\text{ав}}$ — расчетная масса пыли, поступившей в помещение в результате аварийной ситуации, кг.

Расчетная масса взвешенной пыли $m_{\text{вз}}$ определяется по формуле:

$$m_{\text{вз}} = K_{\text{вз}} m_{\text{п}}, \quad (3.17)$$

где $K_{вз}$ — доля отложившейся в помещении пыли, способной перейти во взвешенное состояние в результате аварийной ситуации. При отсутствии экспериментальных сведений о величине $K_{вз}$ допускается принимать $K_{вз} = 0,9$;

m_n — масса отложившейся в помещении пыли к моменту аварии, кг.

Расчетная масса пыли, поступившей в помещение в результате аварийной ситуации, $m_{ав}$ (кг), определяется по формуле:

$$m_{ав} = (m_{ап} + qT)K_n, \quad (3.18)$$

где $m_{ап}$ — масса горючей пыли, выбрасываемой в помещение из аппарата, кг;

q — производительность, с которой продолжается поступление пылевидных веществ в аварийный аппарат по трубопроводам до момента их отключения, $\text{кг} \cdot \text{с}^{-1}$;

T — время отключения, с;

K_n — коэффициент пыления, представляющий отношение массы взвешенной в воздухе пыли ко всей массе пыли, поступившей из аппарата в помещение. При отсутствии экспериментальных сведений о величине K_n допускается полагать: для пылей с размером не менее 350 мкм — $K_n = 0,5$; для пылей менее 350 мкм — $K_n = 1,0$.

Масса пыли, отложившейся в помещении к моменту аварии, определяется по формуле:

$$m_n = \frac{K_r}{K_y} \cdot (m_1 + m_2), \quad (3.19)$$

где K_r — доля горючей пыли в общей массе отложений пыли;

m_1 — масса пыли, оседающей на труднодоступных для уборки поверхностях в помещении за период времени между генеральными уборками, кг;

m_2 — масса пыли, оседающей на доступных для уборки поверхностях в помещении за период времени между текущими уборками, кг;

K_y — коэффициент эффективности пылеуборки.

Принимается при ручной пылеуборке:

сухой — 0,6;

влажной — 0,7.

При механизированной вакуумной уборке:

пол ровный — 0,9;

пол с выбоинами (до 5 % площади) — 0,7.

Под труднодоступными для уборки площадями подразумевают такие поверхности в производственных помещениях, очистка которых осуществляется только при генеральных уборках пыли. Доступными для уборки местами являются поверхности, пыль с которых удаляется в процессе текущих уборок (ежедневно, ежесуточно и т. п.).

Масса пыли m_i ($i = 1, 2$), оседающей на различных поверхностях в помещении за межуборный период, определяется по формуле:

$$m_i = M_i(1 - a)\beta_i \quad (i = 1, 2), \quad (3.20)$$

где $M_i = \sum_j M_{1j}$ — масса пыли, выделяющаяся в объем помещения за

период времени между генеральными пылеуборками, кг;

M_{1j} — масса пыли, выделяемая единицей пылящего оборудования за указанный период, кг;

$M_2 = \sum_j M_{2j}$ — масса пыли, выделяющаяся в объем помещения за

период времени между текущими пылеуборками, кг;

M_{2j} — масса пыли, выделяемая единицей пылящего оборудования за указанный период, кг;

α — доля выделяющейся в объем помещения пыли, которая удаляется вытяжными вентиляционными системами. При отсутствии экспериментальных сведений о величине α полагают $\alpha = 0$;

β_1, β_2 — доли выделяющейся в объем помещения пыли, оседающей соответственно на труднодоступных и доступных для уборки поверхностях помещения ($\beta_1 + \beta_2 = 1$). При отсутствии сведений о величине коэффициентов β_1 и β_2 допускается полагать $\beta_1 = 1, \beta_2 = 0$.

3.3. Методика расчета избыточного давления взрыва горючих газов, паров ЛВЖ и ГЖ в открытом пространстве

Методика расчета избыточного давления взрыва горючих газов, паров легковоспламеняющихся и горючих жидкостей в открытом пространстве состоит из следующих этапов:

- расчета массы горючего газа, горючих паров и сжиженных углеводородных газов, поступивших в окружающее пространство;

- расчета горизонтальных размеров зон, ограничивающих газо- и пароводушные смеси с концентрацией горючего выше НКПР, при аварийном поступлении горючих газов и паров ненагретых легковоспламеняющихся жидкостей в открытое пространство;
- расчета избыточного давления и импульса волны давления при сгорании смесей горючих газов и паров с воздухом в открытом пространстве.

3.3.1. Расчет масс горючих веществ

Масса газа m , кг, поступившего в окружающее пространство при расчетной аварии, определяется аналогично расчету массы горючего газа, поступившего в производственное помещение (см. разд. 3.1).

Масса паров жидкости m , кг, поступивших в окружающее пространство при наличии нескольких источников испарения (поверхность разлитой жидкости, поверхность со свеженанесенным составом, открытые емкости и т. п.), определяется из выражения (3.11) с учетом массы жидкости, испарившейся в окружающее пространство. Отсюда выражение (3.11) примет вид:

$$m = m_p + m_{\text{емк}} + m_{\text{св.окр}} + m_n, \quad (3.21)$$

где m_n — масса жидкости, испарившейся в окружающее пространство в случае ее перегрева, кг.

При этом слагаемые m_p , $m_{\text{емк}}$, $m_{\text{св.окр}}$ в формуле (3.21) определяют из выражения (3.12), в котором τ учитывает продолжительность поступления пара легковоспламеняющихся и горючих жидкостей в окружающее пространство.

Величину m_n определяют по формуле (при $T_{\text{ж}} > T_{\text{кип}}$):

$$m_n = \min \left\{ 0,8m_n; \frac{2C_p(T_{\text{ж}} - T_{\text{кип}})}{L_{\text{исп}}} m_n \right\}, \quad (3.22)$$

где C_p — удельная теплоемкость жидкости при температуре перегрева жидкости T_a , Дж · кг⁻¹ · К⁻¹;

$T_{\text{ж}}$ — температура перегретой жидкости в соответствии с технологическим регламентом в технологическом аппарате или оборудовании, К;

$T_{\text{кип}}$ — нормальная температура кипения жидкости, К;

$L_{\text{исп}}$ — удельная теплота испарения жидкости при температуре перегрева жидкости T_a , Дж · кг⁻¹.

Интенсивность испарения W определяется по справочным и экспериментальным данным. Для ненагретых ЛВЖ при отсутствии данных допускается рассчитывать W по формуле (3.13).

Для сжиженных углеводородных газов (СУГ) при отсутствии данных допускается рассчитывать удельную массу испарившегося СУГ $m_{\text{суг}}$ (кг · м⁻²) по формуле

$$m_{\text{суг}} = \frac{M}{L_{\text{исп}}} \cdot (T_o - T_{\text{ж}}) \left(2\lambda_{\text{ТВ}} \sqrt{\frac{t}{\pi \cdot \alpha}} + \frac{5,1\sqrt{\text{Re}} \cdot \lambda_{\text{в}} \cdot t}{d} \right), \quad (3.23)$$

где M — молярная масса СУГ, кг · моль⁻¹;

$L_{\text{исп}}$ — мольная теплота испарения СУГ при начальной температуре $T_{\text{ж}}$, Дж · моль⁻¹;

T_o — начальная температура материала, на поверхность которого разливается СУГ, К;

$T_{\text{ж}}$ — начальная температура СУГ, К;

$\lambda_{\text{ТВ}}$ — коэффициент теплопроводности материала, на поверхность которого разливается СУГ, Вт · м⁻¹ · К⁻¹;

t — текущее время, с, принимаемое равным времени полного испарения СУГ, но не более 3600 с;

$\lambda_{\text{в}}$ — коэффициент теплопроводности воздуха, Вт · м⁻¹ · К⁻¹.

Коэффициент температуропроводности материала, на поверхность которого разливается СУГ, м² · с⁻¹:

$$\alpha = \frac{\lambda_{\text{ТВ}}}{C_{\text{ТВ}} \cdot \rho_{\text{ТВ}}}, \quad (3.24)$$

где $C_{\text{ТВ}}$ — теплоемкость материала, на поверхность которого разливается СУГ, Дж · кг⁻¹ · К⁻¹;

$\rho_{\text{ТВ}}$ — плотность материала, на поверхность которого разливается СУГ, кг · м⁻³.

Число Рейнольдса определяют по зависимости:

$$\text{Re} = \frac{U \cdot d}{\nu_{\text{в}}},$$

где U — скорость воздушного потока, м · с⁻¹;

$d = \sqrt{\frac{4F_H}{\pi}}$ — характерный размер пролива СУГ, м;

ν_B — кинематическая вязкость воздуха, $\text{м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$.

Формула (3.23) справедлива для СУГ с температурой $T_{\text{ж}} \leq T_{\text{кип}}$. При температуре СУГ $T_{\text{ж}} > T_{\text{кип}}$ дополнительно рассчитывается масса перегретых СУГ $m_{\text{пер}}$ по формуле (3.22).

3.3.2. Расчет горизонтальных размеров зон горючей смеси при аварийных выбросах в открытое пространство

Расчет горизонтальных размеров зон, ограничивающих газо- и паровоздушные смеси с концентрацией горючего выше НКПР осуществляется по формулам, м:

- для горючих газов (ГГ):

$$R_{\text{НКПР}} = 14,5632 \left(\frac{m_{\text{Г}}}{\rho_{\text{Г}} \Phi_{\text{НКПР}}} \right)^{0,333}, \quad (3.25)$$

- для паров не нагретых легковоспламеняющихся жидкостей (ЛВЖ):

$$R_{\text{НКПР}} = 3,1501 \sqrt{K} \left(\frac{\rho_{\text{н}}}{\Phi_{\text{НКПР}}} \right)^{0,813} \left(\frac{m_{\text{п}}}{\rho_{\text{п}} \cdot \rho_{\text{н}}} \right)^{0,333}, \quad (3.26)$$

где $m_{\text{Г}}$ — масса поступивших в открытое пространство ГГ при аварийной ситуации, кг;

$\rho_{\text{Г}}$ — плотность ГГ при расчетной температуре и атмосферном давлении, $\text{кг} \cdot \text{м}^{-3}$;

$m_{\text{п}}$ — масса паров ЛВЖ, поступивших в открытое пространство за время полного испарения, но не более 3600 с, кг;

$\rho_{\text{п}}$ — плотность паров ЛВЖ при расчетной температуре и атмосферном давлении, $\text{кг} \cdot \text{м}^{-3}$;

$\rho_{\text{н}}$ — давление насыщенных паров ЛВЖ при расчетной температуре, кПа;

K — коэффициент, принимаемый равным $K = \frac{T}{3600}$ для ЛВЖ;

T — продолжительность поступления паров ЛВЖ в открытое пространство, с;

$\rho_{\text{НКПР}}$ — нижний концентрационный предел распространения пламени ГГ или паров ЛВЖ, % об.

Плотность газа или пара рассчитывают по формуле

$$\rho_{\text{Г(п)}} = \frac{M}{V_0(1 + 0,00367t_p)}, \quad (3.27)$$

где M — молярная масса, кг · кмоль⁻¹;

V_0 — мольный объем, равный 22,4 м³ · кмоль⁻¹;

t_p — расчетная температура, °С.

В качестве расчетной температуры следует принимать максимально возможную температуру воздуха в соответствующей климатической зоне или максимально возможную температуру воздуха по технологическому регламенту с учетом возможного повышения температуры в аварийной ситуации. Если такого значения расчетной температуры t_p по каким-либо причинам определить не удастся, допускается принимать ее равной 61 °С.

За начало отсчета горизонтального размера зоны принимают внешние габаритные размеры аппаратов, установок, трубопроводов и т. п. Во всех случаях значение $R_{\text{НКПР}}$ должно быть не менее 0,3 м для ГГ и ЛВЖ.

3.3.3. Расчет избыточного давления и импульса волны давления

Величину избыточного давления Δp , кПа, развиваемого при сгорании газо-, паровоздушных смесей в открытом пространстве, определяют по формуле

$$\Delta p = p_0 \left(\frac{0,8m_{\text{пр}}^{0,33}}{r} + \frac{3m_{\text{пр}}^{0,66}}{r^2} + \frac{5m_{\text{пр}}}{r^3} \right), \quad (3.28)$$

где p_0 — атмосферное давление, кПа (допускается принимать равным 101 кПа);

r — расстояние от геометрического центра газопаровоздушного облака, м;

$m_{\text{пр}}$ — приведенная масса газа или пара, кг.

Приведенную массу газа или пара вычисляют по формуле

$$m_{\text{пр}} = \left(\frac{Q_{\text{сг}}}{Q_o} \right) \cdot m \cdot Z, \quad (3.29)$$

где $Q_{\text{сг}}$ — удельная теплота горения газа или пара, Дж · кг⁻¹;

Z — коэффициент участия горючих газов и паров в горении, который допускается принимать равным 0,1;

Q_o — константа, равная $4,52 \cdot 10^6$ Дж · кг⁻¹;

m — масса горючих газов и (или) паров, поступивших в результате аварии в окружающее пространство, кг.

Величину импульса волны давления i , (Па · с) вычисляют по формуле

$$i = 123 \frac{m_{\text{пр}}^{0,66}}{r}. \quad (3.30)$$

3.3.4. Расчет критериев взрывопожарной опасности для горючей пыли

Количество веществ, которые могут образовать горючие и взрывоопасные пылевоздушные смеси, определяется в предположении, что в момент расчетной аварии произошла плановая или внезапная разгерметизация одного из технологических аппаратов, за которой последовал аварийный выброс в окружающее пространство находившейся в аппарате пыли.

Расчетная масса пыли, поступившей в окружающее пространство при расчетной аварии, определяется по формуле (3.16).

При этом величину $m_{\text{вз}}$ определяют по формуле, аналогичной (3.17):

$$m_{\text{вз}} = K_r K_{\text{вз}} m_{\text{п}}, \quad (3.31)$$

где K_r — доля горючей пыли в общей массе отложений пыли;

$K_{\text{вз}}$ — доля отложенной вблизи аппарата пыли, способной перейти во взвешенное состояние в результате аварийной ситуации. В отсутствие экспериментальных данных о величине $K_{\text{вз}}$ допускается принимать $K_{\text{вз}} = 0,9$;

$m_{\text{п}}$ — масса отложившейся вблизи аппарата пыли к моменту аварии, кг.

Величину $m_{ав}$ определяют по формуле (3.18).

Избыточное давление Δp для горючей пыли рассчитывается следующим образом.

Определяют приведенную массу горючей пыли (кг), по формуле, аналогичной (3.29):

$$m_{пр} = mZ \frac{H_{т}}{H_{то}}, \quad (3.32)$$

где m — масса горючей пыли, поступившей в результате аварии в окружающее пространство, кг;

Z — коэффициент участия пыли в горении, значение которого допускается принимать равным 0,1. В отдельных обоснованных случаях величина Z может быть снижена, но не менее чем до 0,02;

$H_{т}$ — теплота горения пыли, Дж · кг⁻¹;

$H_{то}$ — константа, принимаемая равной $4,6 \cdot 10^6$ Дж · кг⁻¹.

Вычисляют расчетное избыточное давление (кПа) по (3.28).

Величину импульса волны давления i (Па · с), вычисляют по формуле (3.30):

$$i = 123 \frac{m_{пр}^{0,66}}{r}.$$

3.4. Методика расчета интенсивности теплового излучения огненного шара

При разрушении резервуара с ЛВЖ, ГГ, СУГ выброс горючего вещества в атмосферу приводит к образованию облака. Облако смеси паров или газов с воздухом, переобогащенное горючими веществами, не способно гореть в детонационном режиме. Оно начинает гореть с внешней оболочки, горит по дефлаграционному механизму и образует огненный шар.

Огненный шар — крупномасштабное диффузионное горение, реализуемое при разрыве резервуара с горючей жидкостью или газом под давлением с воспламенением содержимого резервуара.

Высокотемпературные продукты горения светятся и излучают тепловую энергию, что может стать причиной ожогов кожных покровов людей, находящихся на опасных расстояниях. Огненный шар зарождается в момент контакта облака с источником зажигания. Поднима-

ясь, шар образует грибовидное облако, ножка которого — восходящие конвективные потоки воздуха. Вовлекаемый воздух разбавляет и охлаждает газы, радиационные потери также вносят свой вклад в процесс быстрого охлаждения. Горение газов и вовлеченного воздуха продолжается до тех пор, пока температура горения не становится меньше температуры воспламенения.

Интенсивность теплового излучения q , кВт м⁻², для пожара пролива жидкости или при горении твердых материалов вычисляют по формуле:

$$q = E_f F_q \tau, \quad (3.33)$$

где E_f — среднеповерхностная плотность теплового излучения пламени, кВт · м⁻²;

F_q — угловой коэффициент облученности;

τ — коэффициент пропускания атмосферы.

Величину E_f определяют на основе имеющихся экспериментальных данных. Допускается для огненного шара принимать E_f равным 450 кВт · м⁻².

Угловой коэффициент облученности определяют по формуле:

$$F_q = \frac{\frac{H}{d_s} + 0,5}{4 \left[\left(\frac{H}{d_s} + 0,5 \right)^2 + \left(\frac{r}{d_s} \right)^2 \right]^{1,5}}, \quad (3.34)$$

где H — высота центра огненного шара, м;

d_s — эффективный диаметр огненного шара, м;

r — расстояние от облучаемого объекта до точки на поверхности земли непосредственно под центром огненного шара, м.

Эффективный диаметр огненного шара d_s определяют по формуле

$$d_s = 5,33m^{0,327}, \quad (3.35)$$

где m — масса горючего вещества, кг.

Величину H определяют в ходе специальных исследований. Допускается принимать величину H равной $d_s/2$.

Время существования огненного шара τ_s , с, определяют по формуле

$$\tau_s = 0,92m^{0,303}, \quad (3.36)$$

Коэффициент пропускания атмосферы рассчитывают по формуле

$$\tau = \exp \left[-7,0 \cdot 10^{-4} \left(\sqrt{r^2 + H^2} - \frac{d_s}{2} \right) \right]. \quad (3.37)$$

Значение среднеповерхностной плотности теплового излучения пламени E_f принимается на основе имеющихся экспериментальных данных. Для некоторых жидких углеводородных топлив указанные данные приведены в табл. 3.3.

При отсутствии данных допускается принимать величину E_f , равной: 100 кВт м^{-2} — для СУГ (сжиженные углеводородные газы), $40 \text{ кВт} \cdot \text{м}^{-2}$ — для нефтепродуктов, 40 кВт м^{-2} для твердых материалов.

Таблица 3.3. Среднеповерхностная плотность теплового излучения пламени в зависимости от диаметра очага и удельная массовая скорость выгорания для некоторых жидких углеводородных топлив

Топливо	$E_f = \text{Вт} \cdot \text{м}^2$					$m, \text{кг} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$
	$d = 10 \text{ м}$	$d = 20 \text{ м}$	$d = 30 \text{ м}$	$d = 40 \text{ м}$	$d = 50 \text{ м}$	
СУГ (Метан)	220	180	150	130	120	0,08
СУГ (Пропан-бутан)	80	63	50	43	40	0,10
Бензин	60	47	35	28	25	0,06
Дизельное топливо	40	32	25	21	18	0,04
Нефть	25	19	15	12	10	0,04

Примечание. Для диаметров очагов менее 10 м или более 50 м следует принимать величину E_f такой же, как и для очагов диаметром 10 м и 50 м, соответственно.

3.5. Оценка ситуации при взрыве резервуара высокого давления с химически инертным газом

При взрыве резервуаров высокого давления с химически инертными газами могут образовываться ударные волны, способные привести к серьезным разрушениям и травмам. Энергию взрыва сосуда под давлением можно оценить по величине работы адиабатического расширения сжатого газа:

$$E_n = \frac{p_1 - p_0}{k_r - 1} \cdot V_r, \text{ Дж}, \quad (3.38)$$

где p_1 — абсолютное давление газ в резервуаре до взрыва, Па;

p_0 — атмосферное давление, Па;

k_r — показатель адиабаты газа, находящегося в резервуаре;

V_r — объем резервуара, м³.

Предполагаем, что описание газодинамики взрывного процесса исходит из теории точечного взрыва. Математическая модель ударной волны будет основываться на приближении аналитических выражений с использованием безразмерных величин. Безразмерное расстояние от центра взрыва до фронта ударной волны можно получить из выражения:

$$R_s = \frac{R_{np}}{X_0}, \quad (3.39)$$

где

$$X_0 = \sqrt[3]{\frac{k_{y,v} E_n}{p_0}}, \text{ м, —} \quad (3.40)$$

динамический параметр;

R_{np} — расстояние от центра взрыва до расчетной точки, м;

$k_{y,v}$ — коэффициент перехода энергии взрывного процесса в энергию ударной волны (в первом приближении $k_{y,v} = 0,5$).

Давление на фронте ударной волны можно определить по следующим уравнениям:

$$p_s = \begin{cases} \frac{4}{k+1} \cdot \frac{p_0}{-1 + \sqrt{1 + 25 \cdot k \cdot \alpha \cdot R_s^3}}, \text{ Па, } 0 \leq R_s < 2; \\ \frac{4}{k+1} \cdot \frac{p_0}{-1 + \sqrt{1 + 50kR_s^2 [\ln(R_s/2) + 1]}}, \text{ Па, } R_s \geq 2, \end{cases} \quad (3.41)$$

где k — показатель адиабаты для газообразной среды, в которой образуется ударная волна;

α — энергетический параметр взрыва.

Энергетический параметр взрыва α определяется по формулам вида:

$$\alpha = a_1 (k-1)^{a_2 + a_3 \lg(k-1)}, \quad k \leq 2;$$

$$\alpha = a_1 k^{-21448 + 0,2325 \lg k}, \quad k > 2.$$

Значения коэффициентов a_1, a_2, a_3 приведены в табл. 3.4.

Скорость частиц газа за фронтом ударной волны вычисляется по формулам:

$$u_s = \begin{cases} \frac{4C_1}{5(k+1)} \cdot \frac{1}{R_s^{1.5} \sqrt{\alpha k}}, \text{ м/с, при } R_s < 2; \\ \frac{4C_1}{5(k+1)} \cdot \frac{1}{\sqrt{2\alpha k}} \cdot \frac{1}{R_s \sqrt{\ln(R_s/2) + 1}}, \text{ м/с, при } R_s \geq 2, \end{cases} \quad (3.42)$$

где C_1 — скорость звука при атмосферном давлении:

$$C_1 = \sqrt{\frac{kp_0}{\rho_0}}, \text{ м/с,} \quad (3.43)$$

где ρ_0 — плотность воздуха при p_0 , кг/м³.

Таблица 3.4. Коэффициенты для вычисления энергетического параметра

Параметр симметрии ударной волны	Показатель адиабаты, k	a_1	a_2	a_3
1	1,1–3	0,36011	-1,2700	-0,17912
1	1,2–2	0,36594	-1,2537	-0,18471
2	1,1–3	0,34649	-1,19796	-0,14134
2	1,2–2	0,35246	-1,1768	-0,13945
3	1,1–3	0,30774	-1,1598	-0,11917
3	1,2–2	0,31246	-1,1409	-0,11735

Скорость движения фронта ударной волны (скорость детонационной волны):

$$U_{\text{дет}} = 0,25 u_s + 0,5 \sqrt{0,25(k+1)^2 u_s^2 + 4C_1^2}, \text{ м/с.} \quad (3.44)$$

Плотность воздуха при давлении сжатия:

$$\rho_s = \frac{(k+1)\rho_0}{(k-1) \left[1 + 2 \cdot \frac{C_1^2}{U_{\text{дет}}^2 (k-1)} \right]}, \text{ кг/м}^3. \quad (3.45)$$

Значение импульса фазы сжатия ударной волны определяется из приближенного значения:

$$i_s = 0,01323 \cdot \frac{k(k+1)p_0 X_0}{C_1 R_s}, \text{ Па} \cdot \text{с}. \quad (3.46)$$

Динамическое давление воздушного потока, следующего за фронтом ударной волны:

$$p_{\text{дин}} = 0,5 \rho_s u_s^2, \text{ Па}. \quad (3.47)$$

Уровень звукового давления, соответствующего давлению на фронте ударной волны:

$$L = 20 \lg \frac{p_s}{2 \cdot 10^{-5}}, \text{ дБ}. \quad (3.48)$$

Для сферической симметрии ударной волны (параметр симметрии — 3) и воздушной среды ($k = 1,4$):
энергетический параметр

$$\begin{aligned} \alpha &= a_1 (k-1)^{a_2 + a_3 \lg(k-1)} = \\ &= 0,3125 (1,4 - 1)^{-1,141 - 0,1174 \lg(1,4 - 1)} = 0,8516; \end{aligned}$$

давление на фронте при $0 \leq R_s < 2$:

$$p_s = \frac{p_0}{0,6(-1 + \sqrt{1 + 29,805 \cdot R_s^3})}, \text{ Па}; \quad (3.49)$$

давление на фронте при $R_s \geq 2$:

$$p_s = \frac{p_0}{0,6(-1 + \sqrt{1 + 70 R_s^2 [\ln(R_s/2) + 1]})}, \text{ Па}; \quad (3.50)$$

скорость воздушного потока при $0 < R_s < 2$:

$$u_s = \frac{0,3053 C_1}{R_s^{1,5}}, \text{ м/с}; \quad (3.51)$$

скорость воздушного потока при $R_s \geq 2$:

$$u_s = \frac{0,2159 C_1}{R_s \sqrt{\ln(R_s/2) + 1}}, \text{ м/с}; \quad (3.52)$$

импульс фазы сжатия:

$$i_s = 0,4445 \cdot \frac{p_o X_o}{C_1 R_s}, \text{ Па} \cdot \text{с}. \quad (3.53)$$

Пример. В сферическом резервуаре радиусом 1 м давление азота в момент взрыва составило 3,2 МПа. Определить минимальное расстояние, начиная с которого у человека не происходит временной потери слуха.

Решение

Объем сосуда с азотом составляет:

$$V_r = \frac{4}{3} \pi r^3 = \frac{4}{3} \pi \cdot 1^3 = 4,187 \text{ м}^3.$$

Энергия взрыва по (3.38):

$$\begin{aligned} E_n &= \frac{p_1 - p_o}{k_r - 1} \cdot V_r = \frac{3\,200\,000 - 101\,300}{1,4 - 1} \cdot 4,187 = \\ &= 32\,440\,000 \text{ Дж}. \end{aligned}$$

Динамический параметр по (3.40):

$$X_o = \sqrt[3]{\frac{k_{y,v} E_n}{p_o}} = \frac{0,5 \cdot 32\,440\,000}{101\,300} = 5,4299 \text{ м}.$$

Задаемся значением расстояния от центра взрыва до приемника ударной волны $R_{np} = 40$ м. Безразмерное расстояние от центра взрыва до фронта ударной волны определяем по (3.39):

$$R_s = \frac{R_{np}}{X_o} = \frac{40}{5,4299} = 7,3666.$$

Скорость звука при атмосферном давлении определяем по (3.43):

$$C_1 = \sqrt{\frac{k \cdot p_o}{\rho_o}} = \sqrt{\frac{1,4 \cdot 101300}{1,293}} = 331,2 \text{ м/с}.$$

Импульс фазы сжатия вычисляем по (3.46):

$$\begin{aligned} i_s &= 0,4445 \cdot \frac{p_o X_o}{C_1 R_s} = 0,4445 \cdot \frac{101300 \cdot 5,4299}{331,2 \cdot 7,3666} = \\ &= 10,02 \text{ Па} \cdot \text{с}. \end{aligned}$$

Границей звуковой травмы для $i_s > 4$ Па · с является уровень звукового давления $L = 160$ дБ (3.48):

$$L = 20 \cdot \lg \frac{p_s}{2 \cdot 10^{-5}} = 160 \text{ дБ.}$$

Вычисляем по (3.50) давление во фронте, получаем $p_s = 2000$ Па.

Вычисляем давление во фронте по (3.41) при $R_{np} = 40$ м, когда $R_s \geq 2$:

$$p_s = \frac{p_o}{0,6(-1 + \sqrt{1 + 70 R_s^2 [\ln(R_s/2) + 1]})} =$$

$$= \frac{101300}{0,6(-1 + \sqrt{1 + 70 \cdot 7,3666^2 \cdot [\ln(7,3666/2) + 1]})} = 1824 \text{ Па.}$$

Полученное значение p_s меньше 2000 Па, потому задаемся новым значением R_{np} и повторяем расчет.

В итоге получим $R_{np} = 37,1$ м.

3.6. Оценка степени разрушения объектов при взрыве

Расчетные величины избыточного давления взрыва позволяют анализировать возможные повреждения объектов, расположенных рядом с очагом взрыва. Для этого используют данные табл. 3.5 и 3.6.

Таблица 3.5. Зависимость степени разрушения от величины избыточного давления

Степень поражения	Избыточное давление, кПа
Полное разрушение зданий	100
50%-ное разрушение зданий	53
Средние повреждения зданий	28
Умеренные повреждения зданий (повреждение внутренних перегородок, рам, дверей)	12
Нижний порог повреждения человека волной давления	5
Малые повреждения (разбита часть остекления)	3

Таблица 3.6. Зависимость степени разрушения объектов от величины избыточного давления

Объект	Избыточное давление, $\Delta p_{\text{ф}}$ (кПа), соответствующее степени разрушения			
	полное	сильное	среднее	слабое
Резервуары и емкости стальные наземные	90	80	55	35
Газгольдеры, хранилища горюче-смазочных материалов и химических веществ	40	35	25	20
Частично заглубленные резервуары для хранения нефтепродуктов	100	75	40	20
Подземные резервуары	200	150	75	40
Кирпичные многоэтажные здания	30—40	20—30	10—20	8—10
Кирпичные малоэтажные здания	35—45	25—35	15—25	8—15
Деревянные здания	20—30	12—20	8—12	6—8
Промышленные здания с тяжелым металлическим и железобетонным каркасом	60—100	50—60	40—50	20—40
Промышленные здания бескаркасной конструкции и с легким металлическим каркасом	60—80	40—50	30—40	20—30
Трубопроводы наземные	20	50	130	—
Трубопроводы на эстакадах	100	40—60	20—40	10—20

Практические работы

Практическая работа 9 РАСЧЕТ ТЕМПЕРАТУРЫ И ДАВЛЕНИЯ ВЗРЫВА В ЗАМКНУТОМ ОБЪЕМЕ

Цель работы: освоить методы расчета температуры и давления при взрыве. Научиться использовать для расчетов справочные данные.

Общие положения

При горении газовых смесей в замкнутом объеме продукты горения не совершают работу, поэтому энергия взрыва расходуется на нагрев продуктов взрыва. В этом случае полная энергия определяется как сумма внутренней энергии взрывчатой парогазовоздушной смеси $Q_{\text{вн.эн.см}}$ и теплоты горения данного вещества $Q_{\text{гор}}$. Величина $Q_{\text{вн.эн.см}}$ равна сумме произведений теплоемкости компонентов горючей взрывчатой смеси при постоянном объеме на начальную температуру смеси (в К):

$$Q_{\text{вн.эн.см}} = \sum_{i=1}^N C_{V_i} T, \quad (3.54)$$

где C_{V_i} — мольная теплоемкость i -го компонента взрывчатой горючей смеси, Дж/(моль \times К);

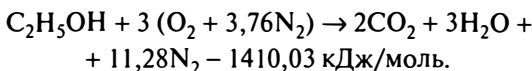
T — начальная температура смеси, К;

N — число компонентов смеси.

Значения внутренней энергии негорючих газов находим по табл. 27, прил. III.

Пример 1. Рассчитать температуру и давление при взрыве паров этилового спирта (этаноло) при начальной температуре 27 °С и давлении 0,1 МПа. Концентрация стехиометрическая.

1. Составим термодинамическое уравнение реакции горения этилового спирта в воздухе



Величину $Q_{\text{гор}} = 1410,03$ кДж/моль находим по табл. 26, прил. III.

2. Определяем внутреннюю энергию паровоздушной смеси по формуле (3.54), где n_1 — число молей этанола, равное 1; n_2 — число молей кислорода, равное 3; n_3 — число молей азота, равное 11,28.

Мольные теплоемкости каждого компонента смеси при постоянном объеме C_{V_i} могут быть вычислены по формуле

$$C_{V_i} = C_{p_i} - R, \quad (3.55)$$

где C_{p_i} — мольная теплоемкость при постоянном давлении справочное значение (см. табл. 26, прил. III);

R — газовая постоянная, $R = 8,31$ Дж/(моль \times К) (см. прил. II);

По табл. 26, прил. III находим значение C_{p_i} , Дж/(моль \times К):

$$C_{p(\text{этаноло})} = 71,1; \quad C_{p(\text{N}_2)} = 29,12; \quad C_{p(\text{O}_2)} = 29,37.$$

Рассчитываем мольные теплоемкости каждого компонента по (3.55):

$$C_{V(\text{этаноло})} = 71,1 - 8,31 = 62,79 \text{ Дж/(моль} \times \text{K)};$$

$$C_{V(\text{O}_2)} = 29,37 - 8,31 = 21,06 \text{ Дж/(моль} \times \text{K)};$$

$$C_{V(\text{N}_2)} = 29,12 - 8,31 = 20,81 \text{ Дж/(моль} \times \text{K)}.$$

По (3.54) рассчитываем внутреннюю энергию паровоздушной смеси при 300 К:

$$\begin{aligned} Q_{\text{вн.эн.см}} &= 62,79 \times 300 + 3 \times 21,06 \times 300 + 11,28 \times 20,81 \times 300 = \\ &= 108\,212 \text{ Дж.} \end{aligned}$$

3. Определяем теплоту взрыва смеси по формулам

$$Q_{\text{вн.эн.см}} = (Q_{\text{взр}} - Q_{\text{г.в}} n_{\text{г.в}}), \quad (3.56)$$

отсюда

$$Q_{\text{взр}} = (Q_{\text{г.в}} n_{\text{г.в}} + Q_{\text{вн.эн.см}}),$$

где $n_{\text{г.в}}$ — число молей горючего вещества, равное 1;

$Q_{\text{г.в}}$ — теплота горения этилового спирта, определяем по табл. 26, прил. III, переводим в Джоули и производим расчет теплоты взрыва.

$$Q_{\text{взр}} = 1\,410\,030 \times 1 + 108\,212 = 1\,518\,242 \text{ Дж.}$$

4. Определяем среднюю внутреннюю энергию продуктов взрыва по формуле

$$C_i T_{\text{взр}} = Q_{\text{взр}} / \sum n_i; \quad (3.57)$$

где $\sum n_i$ — общее число молей продуктов взрыва;

$$n_{\text{CO}_2} = 2 \text{ моль};$$

$$n_{\text{H}_2\text{O}} = 3 \text{ моль};$$

$$n_{\text{N}_2} = 11,28 \text{ моль};$$

$$\sum n_i = 2 + 3 + 11,28 = 16,28 \text{ моль};$$

$$C_i T_{\text{взр}} = 1\,518\,242 / 16,28 = 93\,258,1 \text{ Дж/моль.}$$

По табл. 27, прил. III (внутренняя энергия газов) определяем приблизительную температуру взрыва по продуктам горения:

для CO_2 — 2200 К;

для воды — 2600 К;

для азота — 3600 К.

Определяем среднее значение температуры:

$$T_{\text{ср}} = (2200 + 2600 + 3600) / 3 = 2800 \text{ К};$$

$$T_{\text{взр}} = 2800 \text{ К.}$$

5. Вычисляем внутреннюю энергию Q_T продуктов взрыва при 2800 К.

$$Q_{2800} = 2 \times 127\,300 + 3 \times 100\,967 + 11,28 \times 70\,865 = 1\,356\,858,2 \text{ Дж};$$

Q_{2800} меньше $Q_{\text{взр}}$, следовательно, $T_{\text{взр}} > 2800 \text{ К}$. Принимаем $T_{\text{взр}} = 3000 \text{ К}$.

6. Вычисляем внутреннюю энергию продуктов взрыва при 3000 К.

$$Q_{3000} = 2 \times 138\,177 + 3 \times 109\,769 + 11,28 \times 76\,605,5 = 1\,469\,765,4 \text{ Дж};$$

Q_{3000} меньше $Q_{\text{взр}}$, следовательно, температура взрыва больше 3000 К.

7. Вычисляем внутреннюю энергию продуктов взрыва при 3200 К.

$$Q_{3200} = 2 \times 149\,025 + 3 \times 118\,850,7 + 11,28 \times 82\,316,7 = 1\,583\,134,48 \text{ Дж.}$$

8. Интерполяцией определяем температуру взрыва:

$$\begin{aligned} T_{\text{взр}} &= 2800 + \frac{(Q_{\text{взр}} - Q_{2800})(3200 - 2800)}{Q_{3200} - Q_{2800}} = \\ &= 2800 + \frac{(1\,518\,242 - 1\,356\,858,2) \cdot 400}{1\,583\,134,48 - 1\,356\,858,2} = 3085,3 \text{ К;} \end{aligned}$$

$$T_{\text{взр}} = 3085 \text{ К.}$$

По температуре взрыва находят давление взрыва. Давление при взрыве газовой смеси в закрытом объеме зависит от температуры взрыва и отношения числа молекул продуктов горения к числу молекул по взрывчатой смеси. При взрыве газовой смеси давление обычно не превышает 1,0 МПа, если первоначальное давление смеси было нормальным.

При замене воздуха во взрывчатой смеси кислородом резко увеличивается давление взрыва, поскольку увеличивается температура горения.

При взрыве даже стехиометрической газовой смеси значительное количество теплоты затрачивается на нагревание азота, находящегося в смеси, поэтому температура взрыва таких смесей намного ниже температуры взрыва смесей с кислородом. Так, давление взрыва стехиометрических смесей метана, этилена, ацетона и метилового эфира с кислородом составляет 1,5—1,9 МПа, а стехиометрических смесей их с воздухом — 1,0 МПа.

Максимальное давление взрыва используют при расчетах взрывоустойчивости аппаратуры, а также в расчетах предохранительных клапанов, разрывных мембран и оболочек взрывонепроницаемого электрооборудования.

Давление взрыва $p_{\text{взр}}$ (в МПа) газовой смеси рассчитывают по следующей формуле:

$$p_{\text{взр}} = \frac{p_0 T_{\text{взр}}}{T_0} \frac{\sum n_i}{\sum n_{\text{см}}}, \quad (3.58)$$

где p_0 — начальное давление взрывчатой смеси, МПа;

T_0 и $T_{\text{взр}}$ — начальная температура взрывчатой смеси и температура взрыва, К;

$\sum n_i$ — число молекул газов продуктов сгорания после взрыва;

$\sum n_{\text{см}}$ — число молекул газов смеси до взрыва.

Пример 2. Вычислить давление при взрыве смеси паров этилового спирта и воздуха по формуле (3.58), если:

$$p_0 = 0,1 \text{ МПа}; \quad T_{\text{взр}} = 2933 \text{ К}; \quad T_0 = 273 + 27 = 300 \text{ К};$$

$$\sum n_i = 2 + 3 + 11,28 = 16,28 \text{ моль (по уравнению горения);}$$

$$\sum n_{\text{см}} = 1 + 3 + 11,28 = 15,28 \text{ моль (по уравнению горения);}$$

$$p_{\text{взр}} = \frac{0,1 \cdot 2933 \cdot 16,28}{300 \cdot 15,28} = 1,04 \text{ МПа.}$$

Ответ. Давление при взрыве паров этилового спирта в воздухе равно 1,04 МПа.

Содержание работы

Задание 1

Рассчитать температуру и давление при взрыве паров горючего с воздухом, если концентрация паров горючего стехиометрическая, начальная температура смеси T_0 , °С, начальное давление p_0 , МПа (табл. 3.7).

Таблица 3.7. Исходные данные для расчета

Вариант	Наименование горючего вещества	p_0 , МПа	T_0 , К	$T_{\text{взр}}$
1	Смесь водорода с воздухом	0,1	300	3087,3
2	Смесь паров ацетона с воздухом	0,15	300	2600
3	Пары этанола с воздухом	0,12	297	2933

Задание 2

Вычислить давление взрывоопасного горючего газа с воздухом, если давление начальное p_0 , МПа; начальная температура — T_0 , К (табл. 3.8).

Таблица 3.8. Исходные данные для расчета

Вариант	Наименование взрывоопасного горючего вещества/смеси	T_0 , °C	p , МПа	Концентрация паров, %
1	Насыщенные пары этанола	25	0,1	Стехиом.
2	Насыщенные пары метанола	27	0,1	Стехиом.
3	Насыщенные пары бензола с воздухом	5	0,1	Стехиом.
4	Пары толуола с воздухом	27	0,1	Стехиом.
5	Пары н-гексана	20	0,1	Стехиом.
6	Этилено-воздушная смесь	25	0,09	Стехиом.
7	Этано-воздушная смесь	27	0,1	Стехиом.
8	Смесь водорода с воздухом	20	0,6	Стехиом.
9	Пары н-бутилового спирта с воздухом	30	0,2	Стехиом.
10	Пары н-пропилового спирта с воздухом	28	0,15	Стехиом.

Методические указания

1. Получите задание и исходные данные для выполнения расчета.
2. Ознакомьтесь с методами определения взрыво- и пожароопасных свойств горючих смесей.
3. Изучите методику расчета температуры и давления взрыва.
4. Изучите необходимые для расчетов формулы.
4. Недостающие для расчетов данные примите по табл. 3.7—3.8 и прил. III, табл. 26—27.
5. Произведите расчеты и оформите отчет.

Содержание отчета

Отчет должен отвечать требованиям общих методических указаний по выполнению работ, содержать обоснованные выводы по результатам расчетов.

В отчете приведите результаты расчетов и ответы на контрольные вопросы.

Контрольные вопросы

1. Дайте определение теплового взрыва.
2. Назовите пределы взрываемости паровоздушной смеси. От чего они зависят?
3. Как рассчитать температуру взрыва; давление взрыва?
4. Проанализируйте параметры взрыва при взрыве сосуда с инертным газом (раздел 3.5).

Практическая работа 10

РАСЧЕТ ТЕМПЕРАТУРЫ И ДАВЛЕНИЯ ВЗРЫВА ДЛЯ ГОРЮЧЕЙ СМЕСИ НЕСТЕХИОМЕТРИЧЕСКОГО СОСТАВА

Цель работы: освоить методику расчета температуры и давления взрыва горючей смеси не стехиометрического состава.

Рассмотрим метод расчета давления и температуры взрыва на следующем примере.

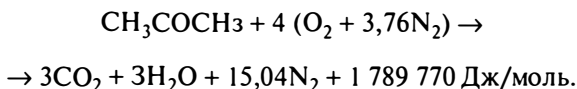
Пример 1. Рассчитать температуру и давление при взрыве паров ацетона в смеси с воздухом, если концентрация паров ацетона составляет 4 %, начальная температура смеси 27 °С и начальное давление 0,1 МПа.

Решение.

1. По табл. 26, прил. III определяем теплоту горения ацетона $Q_{г.в}$ (ΔH_r):

$$Q_{г.в} (\Delta H_r) = 1789,77 \frac{\text{кДж}}{\text{моль}} = 1\,789\,770 \frac{\text{Дж}}{\text{моль}}.$$

2. Составляем термохимическое уравнение реакции горения ацетона в воздухе.



3. Концентрация ацетона исходной смеси составляет 4 %. Поэтому произведем пересчет состава смеси, состоящей из трех компонен-

тов — ацетона, кислорода, азота. Теоретический состав воздуха: 21 % кислорода, 79 % азота.

Итак,

концентрация кислорода:

$$\frac{21(100 - 4)}{100} = 20,16 \%;$$

концентрация азота:

$$\frac{(100 - 4) \cdot 79}{100} = 75,84 \%.$$

4. Предположим, что сгорел 1 моль горючей смеси, тогда смесь будет иметь следующий состав:

ацетона	—	0,04 моля	= $n_{г.в}$
кислорода	—	0,2016 моля	= n_{O_2}
азота	—	0,7584 моля	= n_{N_2}

всего: 1,000 моль = $n_{г.с}$ (сумма молей исходной смеси).

5. Определяем внутреннюю энергию исходной смеси при температуре 27 °С ($T_0 = 300$ К), по формуле (3.54):

$$Q_{вн.эн.см} = \sum n_{г.с} C_{V_i} T_0, \text{ Дж/моль.}$$

Величину C_{V_i} (мольную теплоемкость при постоянном объеме) определим из выражения (3.55). Принимаем по табл. 26, прил. III мольную теплоемкость при постоянном давлении, она равна

$$C_p = 75,3 \text{ Дж}/(\text{моль} \cdot \text{град}).$$

Мольная теплоемкость ацетона при постоянном объеме будет равна:

$$C_V = 75,3 - 8,31 \approx 67 \text{ Дж}/(\text{моль} \cdot \text{град}).$$

6. Вычисляем мольную теплоемкость при постоянном объеме для кислорода и азота по формуле (3.55). Значение мольной теплоемкости при постоянном давлении (C_p) принимаем по табл. 26, прил. III.

Для кислорода:

$$C_{V_{O_2}} = 29,37 - 8,31 = 21,06 \text{ Дж}/(\text{моль} \cdot \text{град}).$$

Вычисляем величину $C_{V_{O_2}} T_0$ при $T_0 = 300$ К.

$$C_{V_{O_2}} T_0 = 21,06 \cdot 300 = 6318 \text{ Дж.}$$

Аналогично производим расчет для азота:

$$C_{V_{N_2}} = 29,1 - 8,31 = 20,89 \text{ Дж/(моль} \cdot \text{град).}$$

$$C_{V_{N_2}} T_0 = 20,89 \cdot 300 = 6243 \text{ Дж.}$$

7. Рассчитываем внутреннюю энергию исходной смеси по формуле (3.54):

$$Q_{\text{вн.эн.см}} = 0,04 \cdot 300 \cdot 67 + 6318 \cdot 0,2016 + 6243,02 \cdot 0,7584 = 6812,4 \text{ Дж.}$$

8. Определяем теплоту взрыва исходной смеси из расчета, что в горючей смеси содержится 0,04 моля ацетона (см. формулу (3.56))

$$Q_{\text{взр}} = 0,04 \cdot 1\,789\,770 + 6812,4 = 78\,403 \text{ Дж.}$$

9. Определяем состав продуктов горения. Стехиометрические коэффициенты принимаем по термохимическому уравнению горения (см. выше п. 2). При сгорании 0,04 моля ацетона выделится углекислого газа:

$$0,04 \cdot 3 = 0,12 \text{ моля} = n_{\text{CO}_2};$$

паров воды:

$$0,04 \cdot 3 = 0,12 \text{ моля} = n_{\text{H}_2\text{O}}.$$

При этом расходуется кислорода $0,04 \cdot 4 = 0,16$ моля, следовательно, избыток кислорода составит

$$n_{\text{O}_2} = 0,2016 - 0,16 = 0,0416 \text{ моля.}$$

Весь азот (0,7584 моля) перейдет в продукты горения.

Итак, состав продуктов горения следующий:

$$n_{\text{CO}_2} = 0,12 \text{ моля;}$$

$$n_{\text{H}_2\text{O}} = 0,12 \text{ моля;}$$

$$n_{\text{O}_2} = 0,0416 \text{ моля;}$$

$$n_{\text{N}_2} = 0,7584 \text{ моля.}$$

$$\sum n_i = 1,04 \text{ моля.}$$

10. Определяем среднее значение внутренней энергии продуктов взрыва по формуле

$$C_V T_{\text{взр}} = Q_{\text{взр}} / \sum n_i.$$

Отсюда

$$C_V T_{\text{взр}} = 78\,403,2 / 1,04 = 75\,387,7 \text{ Дж.}$$

11. По табл. 27, прил. III находим $T_{\text{взр}}$. Для этого сравниваем среднее значение внутренней энергии $C_V T_{\text{взр}} = 75\,387,7$ Дж со значениями внутренних энергий CO_2 , H_2O , O_2 , N_2 . Принимаем $T_{\text{взр}} = 2800$ К.

12. Принимаем температуру продуктов взрыва, равную 2800 К, и определяем внутреннюю энергию продуктов взрыва по формуле (3.54):

$$Q_{\text{п.г}} = n_{\text{CO}_2} C_{V_{\text{CO}_2}} T_{\text{взр}} + n_{\text{H}_2\text{O}} C_{V_{\text{CO}_2}} T_{\text{взр}} + n_{\text{N}_2} C_{V_{\text{N}_2}} T_{\text{взр}} + n_{\text{O}_2} C_{V_{\text{O}_2}} T_{\text{взр}}.$$

Внутреннюю энергию каждого компонента продуктов взрыва находим по табл. 26, прил. III.

$$\begin{aligned} Q_{2800} &= 0,12 \cdot 127\,300,5 + 0,12 \cdot 100\,967,3 + \\ &+ 0,7584 \cdot 70\,865 + 0,0416 \cdot 74\,553,1 = 84\,237,56 \text{ Дж.} \end{aligned}$$

13. Сравниваем теплоту взрыва исходной смеси ($Q_{\text{взр}} = 78\,403$ Дж) с рассчитанной внутренней энергией продуктов взрыва ($Q_{2800} = 84\,237,56$ Дж).

$$Q_{\text{взр}} < Q_{2800},$$

следовательно, температура взрыва меньше 2800 К.

14. Принимаем $T_{\text{взр}} = 2000$ К и определяем внутреннюю энергию продуктов взрыва:

$$\begin{aligned} Q_{2000} &= 0,12 \cdot 95\,035,8 + 0,12 \cdot 65\,510,9 + \\ &+ 0,7584 \cdot 48\,256,2 + 0,0416 \cdot 51\,270,1 = 56\,731,98 \text{ Дж.} \end{aligned}$$

Сравниваем теплоту взрыва исходной смеси с внутренней энергией продуктов взрыва при 2000 К:

$$Q_{\text{взр}} > Q_{2000}.$$

15. Принимаем температуру взрыва 2200 К и определяем внутреннюю энергию продуктов взрыва.

$$Q_{2200} = 0,12 \cdot 95\,035,8 + 0,12 \cdot 74\,092,2 + 0,7584 \cdot 52\,819,4 + \\ + 0,0416 \cdot 57\,210,8 = 62\,733,6 \text{ Дж.}$$

Сравниваем теплоту взрыва исходной смеси с внутренней энергией продуктов взрыва при 2200 К:

$$Q_{\text{взр}} > Q_{2200}.$$

Следовательно, $T_{\text{взр}}$ находится в интервале температур между 2000 и 2200 К.

16. Методом линейной интерполяции определяем температуру взрыва паров ацетона с воздухом.

$$T_{\text{взр}} = 2200 + \frac{(78\,403,32 - 62\,733)(2800 - 2200)}{(84\,152,99 - 62\,733)} = 2637,2 \text{ К.}$$

17. Рассчитываем давление при взрыве паров ацетона с воздухом по формуле (3.58):

$$p_{\text{взр}} = \frac{p_0 T_{\text{взр}} \sum n_i}{T_0 \sum n_{r.c}},$$

где $p_0 = 0,1$ МПа — по условию задачи;

$T_{\text{взр}} = 2637,2$ К — по расчету;

$T_0 = 300$ К — по условию задачи;

$\sum n_i = 1,04$ моля — по расчету;

$\sum n_{r.c} = 1,00$ моль — по условию задачи.

$$p_{\text{взр}} = \frac{0,1 \cdot 2637,2 \cdot 1,04}{300 \cdot 1} = 0,91 \text{ МПа.}$$

Ответ. Давление при взрыве паров ацетона составляет 0,91 МПа.

Содержание работы

Задание 1

Рассчитать температуру и давление при взрыве паров горючего с воздухом, если концентрация паров горючего составляет $X\%$, либо стехиометрическая начальная температура смеси T_0 °С, начальное давление p_0 МПа (табл. 3.9).

Методические указания

1. Получите задание и исходные данные для выполнения расчета.
2. Ознакомьтесь с методами определения взрыво- и пожароопасных свойств горючих смесей.
3. Изучите методику расчета температуры и давления взрыва.
4. Изучите необходимые для расчетов формулы (3.54)—(3.58).
5. Необходимые для расчетов данные примите по табл. 3.9 и табл. 26—27, прил. III.
6. Произведите расчеты и оформите отчет.

Таблица 3.9. Исходные данные для расчета

Вариант	Наименование взрывоопасного горючего вещества/смеси	T_0 , °C	p , МПа	Концентрация паров, с, %
1	Пары метанола с воздухом	27	0,10	10
2	Пары этанола с воздухом	25	0,09	5
3	Пары бензола с воздухом	5	0,12	7
4	Пары толуола с воздухом	30	0,13	10
5	Пропано-воздушная смесь	20	0,10	20
6	Этилено-воздушная смесь	25	0,06	15
7	Этано-воздушная смесь	27	0,21	12
8	Ацетилено-воздушная смесь	30	0,20	3
9	Пары муравьиной кислоты с воздухом	23	0,05	2
10	Метано-воздушная смесь	31	0,10	18

Содержание отчета

Отчет должен отвечать требованиям общих методических указаний по выполнению работ, содержать обоснованные выводы по результатам расчетов.

В отчете приведите результаты расчетов и ответы на контрольные вопросы.

Контрольные вопросы

1. Как рассчитать внутреннюю энергию газо- и паровоздушной смеси?
2. Какая смесь называется стехиометрической, а какая — не стехиометрической?
3. Как определить число молей каждого компонента горючей смеси?
4. Назовите пределы взрываемости паровоздушной смеси. От чего они зависят?
5. Какие факторы влияют на давление взрыва?
6. Проанализируйте параметры взрыва по (3.38)—(3.53) при взрыве сосуда с инертным газом (раздел 3.5).

Практическая работа 11 РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ВОЛНЫ ДАВЛЕНИЯ ПРИ ВЗРЫВЕ

Цель работы: научиться рассчитывать параметры волны давления при взрыве резервуара с перегретой жидкостью или сжиженным газом при воздействии на него очага пожара.

Общие положения

При попадании замкнутого резервуара со сжиженным газом или жидкостью в очаг пожара содержимое резервуара нагревается до температуры, существенно превышающей нормальную температуру кипения. При этом повышается давление. За счет нагрева несмоченных стенок сосуда уменьшается предел прочности их материала, в результате возможен разрыв резервуара с возникновением волн давления и образованием огненного шара.

Разрыв резервуара в очаге пожара с образованием волн давления получил название *BLEVE* (см. раздел 2.1.3).

Возможность возникновения BLEVE для конкретного вещества, хранящегося в замкнутой емкости, определяют следующим образом:

$$\delta = C_p (T - T_{\text{кип}}) / L, \quad (3.59)$$

где C_p — удельная теплоемкость жидкой фазы, Дж/(кг × К);

T — температура жидкой фазы, соответствующая температуре насыщенного пара, при давлении срабатывания предварительного клапана, К;

$T_{\text{кип}}$ — температура кипения вещества при нормальном давлении, К;

L — удельная теплота испарения при температуре кипения $T_{\text{кип}}$, Дж/(кг × К).

В случае если $\delta < 0,35$, BLEVE не происходит.

При $\delta \geq 0,35$ есть вероятность возникновения BLEVE. Параметрами волны давления, образующейся при BLEVE, являются избыточное давление (Δp) и безразмерный импульс (i) положительной фазы волны. Эти величины — Δp (Па) и i (Па · с) — рассчитывают по формулам, описанным выше (3.28) и (3.30):

$$\Delta p = p_0 (0,8 m_{\text{пр}}^{0,33} / r + 3 m_{\text{пр}}^{0,66} / r^2 + 5 m_{\text{пр}} / r^3);$$

$$i = 123 m_{\text{пр}}^{0,66} / r,$$

в которых p_0 — атмосферное давление, кПа (допускается принимать равным 101 кПа);

r — расстояние до разрушающегося резервуара, м;

$m_{\text{пр}}$ — приведенная масса, кг, рассчитанная по формуле

$$m_{\text{пр}} = E_{\text{из}} / Q_0, \quad (3.60)$$

где $E_{\text{из}}$ — энергия, выделяющаяся при изоэнтропическом расширении среды, находящейся в резервуаре, Дж;

Q_0 — константа, равная $4,52 \cdot 10^6$ Дж/кг.

$E_{\text{из}}$, Дж, рассчитывают по формуле

$$E_{\text{из}} = C_{\text{эфф}} m (T - T_{\text{кип}}), \quad (3.61)$$

где $C_{\text{эфф}}$ — константа, равная 500 Дж/(кг × К);

m — масса вещества в резервуаре, кг.

При наличии в резервуаре предохранительного клапана температуры T , К, допускается рассчитывать по формуле

$$T = \frac{B}{A - \lg p_{\text{к}}} - C + 273,15, \quad (3.62)$$

где A , B , C — константы Антуана для горючего вещества (табл. 10, прил. III);

$p_{\text{к}}$ — давление срабатывания предохранительного клапана, кПа.

Расчет параметров ударной волны при BLEVE

Пример. Рассчитать параметры положительной фазы волны давления на расстоянии 750 м от эпицентра аварии, связанной с развитием BLEVE на железнодорожной цистерне вместимостью 50 м^3 с 40 т жидкого пропана. Цистерна имеет предохранительный клапан с давлением срабатывания 2,0 МПа.

Решение

1. Энергию, выделившуюся при расширении среды в резервуаре, рассчитывают по формуле (3.61).

$T_{\text{кип}} = -43 + 273 = 230 \text{ К}$ — температура кипения пропана при постоянном давлении.

Температуру вещества в резервуаре в момент его взрыва T , (К) находим по (3.62), в которой $p_k = 2,0 \text{ кПа}$; $A = 5,949$; $B = 812,648$; $C_a = 247,55$.

Получаем:

$$T = \frac{812,648}{5,949 - \lg 2,000} - 247,55 + 273,15 = 332 \text{ К}.$$

В результате:

$$E_{\text{из}} = 4 \cdot 10^4 (332 - 230) 500 = 2,06 \cdot 10^9 \text{ Дж}.$$

2. Находим приведенную массу $m_{\text{пр}}$, кг, по (3.60):

$$m_{\text{пр}} = 2,06 \cdot 10^9 / (4,52 \cdot 10^6) = 456 \text{ кг}.$$

3. Вычисляем избыточное давление Δp и i по формулам (3.28) и (3.30):

$$\Delta p = 101 (0,8 \cdot 456^{0,33} / 750 + 3 \cdot 456^{0,66} / 750^2 + 5 \cdot 456 / 750^3) = 0,86 \text{ кПа}.$$

$$i = 123 \cdot 456^{0,66} / 750 = 9,7 \text{ Па} \cdot \text{с}.$$

Ответ. Избыточное давление в положительной фазе волны $\Delta p = 0,86 \text{ кПа}$, импульс положительной фазы волны $i = 9,7 \text{ Па} \cdot \text{с}$.

Содержание работы

Задание 1

Рассчитать параметры положительной фазы волны на расстоянии r , м, от эпицентра аварии жидкого пропана. Вместимость цистерны

50 м^3 с массой m . Давление срабатывания предохранительного клапана цистерны 2,0 МПа.

Задание 2

Построить график изменения избыточного давления распространения ударной волны от эпицентра взрыва на расстоянии r (м).

Методические указания

1. Получите задание и исходные данные для выполнения расчета (табл. 3.10).
2. Ознакомьтесь с явлением BLEVE в разделах 2.1.3 и 2.2.1.3 пособия и параметрами ударной волны.
3. Изучите формулы (2.1)—(2.4), характеризующие параметры ударной волны.
4. Изучите алгоритм расчета параметров ударной волны при взрыве по (3.59)—(3.61) резервуара с перегретой жидкостью или сжиженным газом при воздействии на него очага пожара.
5. Выполните расчет по варианту задания и подготовьте отчет.

Таблица 3.10. Исходные данные для расчета параметров взрыва

Вариант	r , м	$m_{\text{пропана}}$, кг	A	B	C
1	800	$4 \cdot 10^4$	5,949	812,648	247,55
2	900	$4,1 \cdot 10^4$			
3	1000	$4,15 \cdot 10^4$			
4	1100	$4,2 \cdot 10^4$			
5	1200	$4,25 \cdot 10^4$			
6	1300	$4,3 \cdot 10^4$			
7	1500	$4,32 \cdot 10^4$			
8	1600	$4,35 \cdot 10^4$			
9	1700	$4,4 \cdot 10^4$			
10	1900	$4,5 \cdot 10^4$			

Содержание отчета

Отчет должен отвечать требованиям общих методических указаний по выполнению работ, иметь обоснованные выводы по результатам расчетов.

В отчете приведите результаты расчетов и ответы на контрольные вопросы.

Контрольные вопросы

1. Охарактеризуйте ударную волну.
2. Назовите основные параметры ударной волны.
3. Поясните условия возможности возникновения взрыва при расширении паров вскипающей жидкости.
4. Поясните, что понимается под явлением BLEVE.
5. Охарактеризуйте методы для расчета параметров взрыва при BLEVE.

Практическая работа 12 РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ВОЛНЫ ДАВЛЕНИЯ ПРИ СГОРАНИИ ПАРОВОЗДУШНОЙ СМЕСИ

Цель работы: освоить метод расчета параметров волны давления при сгорании газопаровоздушных смесей в открытом пространстве.

Общие положения

При сгорании парогазовоздушных смесей в открытом пространстве необходимо определить массу m , кг, горючих газов и/или паров, вышедших в атмосферу из технологического аппарата. Для этого определяют избыточное давление Δp , кПа, развиваемое при сгорании газопаровоздушных смесей по (3.28):

Импульс волны давления i , Па · с, рассчитывают по (3.30).

Пример. Рассчитать избыточное давление и импульс волны давления при выходе в атмосферу пропана, хранящегося в сферической емкости объемом 600 м^3 , на расстоянии 500 м от нее.

Исходные данные для расчета. Объем емкости 600 м³. Температура 20 °С Плотность сжиженного пропана 530 кг/м³. Степень заполнения емкости 80 % (по объему). Удельная теплота горения пропана 4,6 · 10⁷ Дж/кг. Принимается, что в течение времени, необходимого для выхода сжиженного газа из емкости, весь пропан испаряется.

Решение

1. Находим приведенную массу $m_{пр}$ по (3.29):

$$m_{пр} = 4,6 \cdot 10^7 / 4,52 \cdot 10^6 \cdot (0,8 \cdot 530 \cdot 600) \cdot 0,1 = 2,59 \cdot 10^5 \text{ кг.}$$

2. Находим избыточное давление Δp по (3.28):

$$\Delta p = 101 [0,8(2,59 \cdot 10^5)^{0,33} / 500 + 3(2,59 \cdot 10^5)^{0,66} / 500^2 + 5 (2,59 \cdot 10^5) / 500^3] = 15,4 \text{ кПа.}$$

3. Рассчитываем импульс волны давления i по (3.30):

$$i = 123(2,59 \cdot 10^5)^{0,66} / 500 = 920 \text{ Па} \cdot \text{с.}$$

Ответ. Избыточное давление 16,2 кПа, импульс волны давления равен 920 Па · с.

Содержание работы

Задание 1

Определить избыточное давление при взрыве баллона с пропаном емкостью V (м³) и импульс волны на расстоянии r (м) от него, при температуре t (°С), удельная теплота горения пропана 4,6 · 10⁷ Дж/кг, плотность 530 кг/м³. Степень заполнения баллона α (%) (по объему).

Задание 2

Рассчитать избыточное давление и импульс волны давления при выходе в атмосферу бензина, хранящегося в сферической емкости объемом V (м³), на расстоянии r (м) от нее, при температуре t (°С), удельная теплота горения бензина 4,76 · 10⁷ Дж/кг, плотность 790 кг/м³. Степень заполнения баллона $\alpha = 80$ % по объему.

Методические указания

1. Получите задание и исходные данные для выполнения расчета (табл. 3.11, 3.12).
2. Подробно изучите параметры ударной волны и методы их расчета (разделы 2.3 и 3.5).

3. Выполните расчет по варианту задания.

Таблица 3.11. Исходные данные для расчета параметров взрыва по заданию 1

Вариант	Объем емкости $V, \text{ м}^3$	Расстояние от емкости $r, \text{ м}$	Температура $t, \text{ }^\circ\text{C}$	Степень заполнения баллона $\alpha, \text{ \% об.}$
1	10	20	28	60
2	10	30	26	65
3	10	35	25	70
4	50	60	25	80
5	50	70	27	75
6	50	80	26	60
7	50	100	24	50
8	100	70	23	80
9	100	50	22	65
10	150	50	20	75

Таблица 3.12. Исходные данные для расчета параметров взрыва по заданию 2

Вариант	Объем емкости $V, \text{ м}^3$	Расстояние от емкости $r, \text{ м}$	Температура $t, \text{ }^\circ\text{C}$
1	50	500	20
2	70	750	25
3	80	770	27
4	100	500	21
5	120	520	22
6	130	580	23
7	150	600	28
8	170	650	30
9	190	700	19
10	200	1000	18

Содержание отчета

Отчет должен отвечать требованиям общих методических указаний по выполнению работ.

В отчете приведите результаты расчетов, обоснованные выводы по результатам расчетов и ответы на контрольные вопросы.

Контрольные вопросы

1. Поясните, что понимается под явлением взрыва.
2. Дайте определение ударной волны.
3. Объясните, что понимается под положительной и отрицательной фазами ударной волны?
4. Какие методы расчета используются для определения параметров взрыва?
5. Напишите формулу для расчета избыточного давления при сгорании газо-, паровоздушных смесей.

Практическая работа 13

РАСЧЕТ ИНТЕНСИВНОСТИ ТЕПЛООВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ И ВРЕМЕНИ СУЩЕСТВОВАНИЯ ОГНЕННОГО ШАРА

Цель работы: освоить методику расчета интенсивности теплового излучения и времени существования огненного шара.

Основные положения

При проектировании зданий, сооружений, размещении технологического оборудования необходимо предусмотреть комплекс мер по обеспечению пожарной безопасности. Для этого нужно учитывать интенсивность теплового излучения, которое возможно при возникновении пожара. Важно также знать время существования огненного шара.

Расчет интенсивности теплового излучения огненного шара q , кВт/м², производят по (3.33) (раздел 3.4).

Угловой коэффициент облученности (F_q) рассчитывается по (3.34).

Эффективный диаметр огненного шара d_s рассчитывают по (3.35):

Время эффективного существования огненного шара рассчитывают по (3.36).

Коэффициент пропускания атмосферы τ рассчитывают по (3.37).

Пример. Определить время существования огненного шара и интенсивность теплового излучения от него на расстоянии 500 м при разрыве сферической емкости с пропаном объемом 600 м^3 в очаге пожара. Плотность жидкой фазы 530 кг/м^3 . Степень заполнения резервуара жидкой фазы 80 %. Расстояние от облучаемого объекта до точки на поверхности земли непосредственно под центром огненного шара — 500 м.

Решение

1. Находим массу горючего в огненном шаре по формуле

$$m = V\rho\alpha = 600 \cdot 530 \cdot 0,8 = 2,54 \cdot 10^5 \text{ кг},$$

где V — объем резервуара, м^3 ($V = 600 \text{ м}^3$);

ρ — плотность жидкой фазы, кг/м^3 ($\rho = 530 \text{ кг/м}^3$);

α — степень заполнения резервуара ($\alpha = 0,8$).

2. По (3.35) определяем эффективный диаметр огненного шара:

$$d_s = 5,33 (2,54 \cdot 10^5)^{0,327} = 312 \text{ м}.$$

3. По (3.34), принимая $H = d_s/2 = 156 \text{ м}$, находим угловой коэффициент облученности:

$$F_q = \frac{(156/312 + 0,5)}{4[(156/312 + 0,5)^2 + (500/312)^2]^{1,5}} = 0,037.$$

4. По (3.37) находим коэффициент пропускания атмосферы:

$$\tau = \exp [-7,0 \cdot 10^{-4} (\sqrt{500^2 + 156^2} - 312/2)] = 0,077.$$

5. По (3.33), принимая $E_f = 450 \text{ кВт/м}^2$, находим интенсивность теплового излучения:

$$q = 450 \cdot 0,037 \cdot 0,077 = 1,29 \text{ кВт/м}^2.$$

6. По (3.36) определяем время существования огненного шара:

$$\tau_s = 0,92 (2,54 \cdot 10^5)^{0,303} = 40 \text{ с.}$$

Ответ. Время существования огненного шара при разрыве сферической емкости в очаге пожара составляет 40 с.

Содержание работы

Задание 1

Рассчитать время существования огненного шара и интенсивность теплового излучения от него на расстоянии r при разрыве емкости с горючей смесью объемом V в очаге пожара. Степень заполнения резервуара жидкой фазы α , плотность горючего ρ (табл. 3.13).

Таблица 3.13. Исходные данные для расчета

Вариант	Наименование горючего	$V, \text{ м}^3$	α	$\rho, \text{ кг/м}^3$	$r, \text{ м}$
1	Метан	600	0,75	716	300
2	Этан	600	0,8	1342	400
3	Пропан	1500	0,75	530	500
4	Керосин	1500	0,8	845	600
5	Бензин	200	0,8	770	700
6	Метанол	500	0,8	755	800
7	Этанол	300	0,8	725	900
8	Ацетон	600	0,8	725	1000
9	Ацетон	300	0,75	767	550
10	Бензин	300	0,75	770	1500

Методические указания

1. Получите задание и исходные данные для выполнения расчета.
2. Подробно изучите по формулам (2.5)–(2.20) методику расчета параметров и интенсивности теплового потока огненного шара (раздел 2.5).
3. Выполните расчеты по вариантам, согласованным с преподавателем и подготовьте отчет.

Содержание отчета

Отчет должен отвечать требованиям общих методических указаний по выполнению работ, иметь обоснованные выводы по результатам расчетов.

В отчете приведите результаты расчетов и ответы на контрольные вопросы.

Контрольные вопросы

1. Что понимается под огненным шаром?
2. Как рассчитывается интенсивность теплового излучения огненного шара?
3. Приведите формулы для расчета эффективного диаметра огненного шара, его времени существования?

Практическая работа 14

РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ОГНЕННОГО ШАРА, ОБРАЗУЮЩЕГОСЯ ПРИ ВЗРЫВЕ РЕЗЕРВУАРА НА ОТКРЫТОМ ПРОСТРАНСТВЕ

Цель работы: освоить методы расчета параметров огненного шара при взрыве резервуара на открытом пространстве и научиться пользоваться диаграммами зависимости приведенной интенсивности теплового потока от приведенного расстояния.

Основные положения

Огненный шар, образующийся при взрыве резервуара на открытом пространстве автоцистерны с горючим газом, характеризуется диаметром, временем существования, температурой.

Расчет диаметра огненного шара производится по эмпирической формуле (2.11) (см. раздел 2.5).

Продолжительность существования огненного шара зависит от его массы и определяется по формулам (2.12)—(2.13).

Огненный шар вызывает ожоги кожи при определенном пороговом расстоянии. Для определения порогового расстояния используем

диаграмму (см. рис. 2.5), на которой приведена зависимость приведенной интенсивности теплового потока от приведенного расстояния.

Поражающее действие огненного шара определяется его излучательной мощностью, которая рассчитывается по формуле (2.14).

Пример 1. В результате аварии автоцистерны, заполненной $6,8 \cdot 10^4$ кг пропана, образовался огненный шар. Определить:

1) диаметр, время существования и температуру огненного шара, образовавшегося при взрыве пропана;

2) расстояние от места аварии, менее которого возможно образование болезненных ожогов открытых участков кожи людей, присутствовавших при взрыве.

Оценить, как изменились бы ответы, если вместо взрыва автоцистерны произошла бы детонация того же количества ($6,8 \cdot 10^4$) взрывчатого вещества (ВВ)?

Решение

1. По формуле (2.11) рассчитываем диаметр огненного шара, считая, что вещество дает при взрыве температуру около 3600 К.

$$d_{s1} = 3,86 \cdot m^{0,320} = 3,86 \cdot (6,80 \cdot 10^4)^{0,320} = 135,83 \text{ м} \approx 136 \text{ м.}$$

2. По формуле (2.12) определяем продолжительность существования этого огненного шара при температуре 3600 К.

$$\tau_{s1} = 0,299 \cdot m^{0,320} = 0,299 \cdot (6,80 \cdot 10^4)^{0,320} = 10,52 \text{ с.}$$

Средняя температура огненного шара зависит от природы горючего вещества. Для пропана соответствующая температура приблизительно равна 1350 К.

3. Чтобы оценить диаметр «более горючего» огненного шара с температурой около 5000 К, образующегося при детонации твердого ВВ, используем закон подобия, который выражается (2.8). Из нее получаем для вещества с разными температурами соотношение:

$$T_1^{1/3} \cdot d_{s1} / Q^{1/3} = T_2^{1/3} \cdot D_2 / Q^{1/3},$$

отсюда

$$d_{s2} = \frac{T_1^{1/3} d_{s1}}{T_2^{1/3}} = \frac{3600^{1/3} \cdot 136}{1350^{1/3}} = \frac{15,33 \cdot 136}{11,15} = 188,68 \text{ м.}$$

В случае детонации ВВ:

$$d'_{s2} = \frac{3600^{1/3} \cdot 136}{5000^{1/3}} = \frac{15,33 \cdot 136}{17,10} = 121,92 \text{ м.}$$

4. Рассчитываем время существования огненного шара при $T_1 = 1350 \text{ К}$ и $T_2 = 5000 \text{ К}$.

Для расчета используем выражение (2.10) (раздел 2.5), из которого следует:

$$\frac{T_1^{10/3} \tau_{s1}}{m^{1/3}} = \frac{T_2^{10/3} \tau_{s2}}{m^{1/3}};$$

$$\tau_{s2} = \frac{\tau_{s1} T_2^{10/3}}{T_1^{10/3}};$$

$$\tau_{s2} = \frac{10,52 \cdot 3600^{10/3}}{1350^{10/3}} = 276 \text{ с.}$$

Как видно из расчетов, при детонации ВВ образуется огненный шар меньшего диаметра и с меньшим временем существования, хотя и более горячий.

5. Для определения порогового расстояния, на котором возникают ожоги открытых участков кожи, сначала определяем интенсивность тепловой энергии J по графику рис. 2.5, используя расчетную продолжительность излучения огненного шара $\tau_s = 10,52 \text{ с}$. Из этих данных следует, что $J = 1,4 \text{ кВт/м}^2$.

6. Определяем пороговое расстояние до места взрыва цистерны с пропаном. С этой целью вычислим приведенное значение интенсивности теплового потока по формуле $\bar{J} = \frac{J}{T^4} 10^7$:

$$\bar{J} = \frac{1,4 \cdot 10^3 \cdot 10^7}{1350^4} = 4,21 \text{ мВт/(м}^2 \cdot \text{К}^4\text{)}.$$

Из рис. 2.5 следует, что расчетной \bar{J} соответствует значение приведенной величины расстояния \bar{r} , равное $100 \text{ м} \cdot \text{К}^{1/3}/\text{кг}^{1/3}$, откуда пороговое расстояние:

$$r = \frac{100 \text{ м}^{1/3}}{T^{1/3}} = \frac{100 (6,8 \cdot 10^4)^{1/3}}{(1350)^{1/3}} = 369 \text{ м.}$$

7. Определяем пороговое расстояние для детонации ВВ массой $6,8 \cdot 10^4$ кг при температуре 5000 К.

Аналогично по графику рис. 2.5 и $\tau_v = 3,52$ с определяем интенсивность теплового потока $J = 16$ кВт/м², $\bar{J} = 2,56 \cdot 10^4$ Вт/(м² · К⁴) при температуре 5000 К, величина $\bar{r} = 385$ м · К^{1/3}/кг^{1/3}.

Вычисляем пороговое расстояние:

$$r = \frac{\bar{r} m^{1/3}}{T^{1/3}} = \frac{385(6,8 \cdot 10^4)^{1/3}}{(5000)^{1/3}} = 919 \text{ м.}$$

Ответ. При детонации ВВ массой $6,8 \cdot 10^4$ кг образуется огненный шар меньшего диаметра $d_s = 121,92$ м, чем при взрыве цистерны с пропаном. Время существования огненного шара при детонации ВВ меньше (хотя он более горячий). Пороговое расстояние при взрыве пропана значительно меньше (369 м), чем при детонации ВВ (919 м).

Большее расстояние, при котором наблюдается поражение кожи, в случае детонации ВВ объясняется более высокой температурой, которая компенсирует уменьшение диаметра огненного шара и времени излучения.

Пример 2. Рассчитать поражающее действие огненного шара массой 20 т, образовавшегося при сгорании пропана.

Решение

1. По выражению (2.14) (раздел 2.5) рассчитываем мощность, выделяемую при сгорании огненного шара:

$$P = 12,4 \cdot 10^9 \cdot 20^{2/3} = 9,1 \cdot 10^{10} \text{ Вт.}$$

Излучательная мощность составит:

$$P_{\text{и}} = 9,1 \cdot 10^{10} \cdot 0,3 = 2,73 \cdot 10^{10} \text{ Вт.}$$

2. Вычисляем интенсивность энергии облучаемой поверхности по формуле (2.17) (раздел 2.5):

$$J_r = \frac{P_{\text{и}}}{4\pi r^2} = \frac{2,73 \cdot 10^{10}}{4 \cdot 3,14 \cdot r^2} = 2,17 \cdot 10^9 \cdot r^{-2}, \text{ Вт/м}^2.$$

Зависимость дозы теплового облучения от расстояния r для огненного шара массой 20 т показана в табл. 3.14.

Таблица 3.14. Зависимость дозы теплового облучения от расстояния для огненного шара массой 20 т

$J_r = f(r)$	$r, \text{ м}$					
	100	200	400	800	1600	2262
$J_r = 2,17 r^{-2} \text{ Вт/м}^2$	$2,17 \cdot 10^5$	$5,42 \cdot 10^4$	$1,35 \cdot 10^4$	$3,37 \cdot 10^3$	$8,74 \cdot 10^2$	$4,27 \cdot 10^2$
$J_r^{1,333} \tau_s, \text{ Дж/м}^2$	$1,34 \cdot 10^8$	$2,11 \cdot 10^7$	$3,30 \cdot 10^6$	$5,19 \cdot 10^5$	—	—
Фактор ослабления $\lambda = 0,96 - 0,12 \lg r$	0,720	0,683	0,647	0,61	0,575	0,555
Интенсивность после ослабления $J'_r, \text{ Вт/м}^2$	$1,56 \cdot 10^5$	$3,70 \cdot 10^4$	$8,70 \cdot 10^3$	$2,05 \cdot 10^3$	$4,87 \cdot 10^2$	$2,07 \cdot 10^2$
$(J'_r)^{1,333} \tau_s, \text{ Дж/м}^2$	$8,61 \cdot 10^7$	$1,26 \cdot 10^7$	$1,84 \cdot 10^6$	—	—	—
$(J'_r)^{1,15} \tau_s, \text{ Дж/м}^2$	—	—	$3,49 \cdot 10^5$	$6,60 \cdot 10^4$	$1,26 \cdot 10^4$	$5,54 \cdot 10^3$

3. Рассчитываем по формуле (2.6) (раздел 2.5) время существования огненного шара для массы пропана 20 т:

$$\tau_s = 3,8 \cdot \sqrt[3]{m} = 3,8 \cdot \sqrt[3]{20} = 10,3 \text{ с.}$$

4. Определяем индекс дозы по выражению (2.20) при минимальном расстоянии $r = 100$ м для огненного шара (см. табл. 3.14).

$$\text{Индекс дозы} = J_n \cdot r = (2,17 \cdot 10^5)^{1,15} \cdot 10,3 = 5,5 \cdot 10^5 \text{ Дж/м}^2.$$

Полученные расчетные данные сопоставляем с данными табл. 2.4 и делаем вывод, что индекс дозы $5,5 \cdot 10^5 \text{ Дж/м}^2$ вызывает ожоги III степени.

5. Определяем радиус теплового поражения для огненного шара массой 20 т по графику рис. 2.7:

- вероятное расстояние при ожогах III степени составляет приблизительно 200 м;
- максимальное расстояние при ожогах III степени составляет ~ 400 м.

Ответ. Огненный шар массой 20 т, образовавшийся при сгорании пропана, оказывает поражающее действие на расстоянии 200—400 м.

Содержание работы

Задание 1

Определить радиус поражающего действия огненного шара массой 20 т, образовавшегося при сгорании углеводорода. Расстояние от огненного шара до объекта r .

Вариант	1	2	3	4	5	6
r , м	200	400	800	1600	2200	2260

Задание 2

Рассчитать пороговое расстояние для огненного шара, образовавшегося при взрыве емкости, заполненной углеводородом массы $6,8 \cdot 10^2$ кг; температура взрыва $T_{\text{взр}}$, К (табл. 3.15).

Таблица 3.15. Данные для расчета по заданию 2

Вариант	Наименование горючего	$T_{\text{взр}}$, К	$T_{\text{пламени}}$, К
1	Ацетон	2873	2122
2	Этан	1930	2170
3	Метан	2083	2236
4	Пропан	2840	2285
5	Этилен	2989	2395
6	Ацетилен	3079	2610
7	Бензин	2098	1142
8	Октан	2076	1050
9	Этанол	2933	1750

Методические указания

1. Получите задание и исходные данные для выполнения расчета.
2. Подробно изучите раздел 2.5 настоящего пособия.
3. Освойте методику расчета параметров огненного шара.
4. Ознакомьтесь с методами расчета: размеров опасных зон по формулам (3.25)—(3.27), параметров взрыва по формулам (3.28)—(3.30) и критериев пожароопасности по формулам (3.31), (3.32).
5. Выполните расчетные задания и подготовьте отчет.

6. Недостающие для расчетов данные примите по табл. 3.14—3.15 и графикам (см. рис. 2.5—2.7).

Содержание отчетов

Отчет должен отвечать требованиям общих методических указаний по выполнению работ.

В отчете приведите результаты расчетов, обоснованные выводы и ответы на контрольные вопросы.

Контрольные вопросы

1. Поясните, что понимают под огненным шаром.
2. Как рассчитывают параметры огненного шара: диаметр, время его существования?
3. Как определяют пороговое расстояние от места взрыва горючего?
4. Что понимается под дозой теплового облучения? Подтвердите формулами.
5. Какие поражения возникают от воздействия огненного шара? Ответ обоснуйте примерами.

Практическая работа 15

РАСЧЕТ ИНТЕНСИВНОСТИ ТЕПЛОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ ПОЖАРАХ ПРОЛИВОВ ЛВЖ И ГЖ

Цель работы: освоить методику расчета интенсивности теплового излучения при пожарах проливов ЛВЖ и ГЖ.

Основные положения

Расчет интенсивности теплового излучения заключается в следующем.

1. Интенсивность теплового излучения q , кВт/м², рассчитывают по формуле (3.33) (раздел 3.4).

E_f принимают на основе имеющихся экспериментальных данных. Для некоторых сжиженных углеводородных топлив (СУГ) указанные данные приведены в табл. 3.3 (раздел 3.4).

При отсутствии данных допускается E_f принимать равной 100 кВт/м² для СУГ, 40 кВт/м² для нефтепродуктов.

2. Рассчитывают эффективный диаметр пролива d , м, по формуле

$$d = \sqrt{\frac{4S}{\pi}}, \quad (3.63)$$

где S — площадь пролива, м².

3. Рассчитывают высоту пламени H , м, по формуле

$$H = 42d \left(\frac{m}{\rho_o \sqrt{gd}} \right)^{0,61}, \quad (3.64)$$

где m — удельная массовая скорость выгорания топлива, кг/(м² · с);

ρ_o — плотность окружающего воздуха, кг/м³;

g — ускорение свободного падения, равное 9,81 м/с².

4. Определяют угловой коэффициент облученности F_q по формуле

$$F_q = \sqrt{F_V^2 + F_H^2}, \quad (3.65)$$

$$F_v = \frac{1}{\pi} \left[\frac{1}{S_1} \cdot \arctg \left(\frac{h}{\sqrt{S_1^2 - 1}} \right) + \frac{h}{S_1} \left\{ \arctg \left(\frac{\sqrt{S_1 - 1}}{\sqrt{S_1 + 1}} \right) - \right. \right. \\ \left. \left. - \frac{A}{\sqrt{A^2 - 1}} \arctg \left(\sqrt{\frac{(A + 1)(S_1 - 1)}{(A - 1)(S_1 + 1)}} \right) \right\} \right], \quad (3.66)$$

$$A = (h^2 + S_1^2 + 1)/2S_1, \quad (3.67)$$

где $S_1 = 2r/d$ (r — расстояние от геометрического центра пролива до облучаемого объекта).

5. Высота слоя пролившейся жидкости:

$$h = 2H/d; \quad (3.68)$$

$$F_H = \frac{1}{\pi} \left[\frac{(B - 1)/S_1}{\sqrt{B^2 - 1}} \cdot \arctg \left(\sqrt{\frac{(B + 1)(S_1 - 1)}{(B - 1)(S_1 + 1)}} \right) - \right. \\ \left. - \frac{(A - 1)/S_1}{\sqrt{A^2 - 1}} \cdot \arctg \left(\sqrt{\frac{(A + 1)(S_1 - 1)}{(A - 1)(S_1 + 1)}} \right) \right], \quad (3.69)$$

где

$$B = (1 + S_1^2) / (2S). \quad (3.70)$$

6. Определяют коэффициент пропускания атмосферы τ по формуле

$$\tau = \exp [-7,0 \cdot 10^{-4}(r - 0,5d)]. \quad (3.71)$$

Пример. Выполнить расчет теплового излучения от пожара пролива бензина площадью 300 м^2 на расстоянии 40 м от центра пролива.

Решение

1. Определяем эффективный диаметр пролива d по (3.63):

$$d = \sqrt{4 \cdot 300/314} = 19,5 \text{ м.}$$

2. Находим высоту пламени по (3.64), принимая $m = 0,06 \text{ кг}/(\text{м}^2 \times \text{с})$; $q = 981 \text{ м}/\text{с}^2$; $\rho_{\text{в}} = 1,2 \text{ кг}/\text{м}^3$:

$$H = 42 \cdot 19,5 \left(\frac{0,06}{1,2 \sqrt{9,8 \cdot 19,5}} \right)^{0,61} = 26,5 \text{ м.}$$

3. Находим угловой коэффициент облученности F_q по формулам (3.65)–(3.70), принимая $r = 40 \text{ м}$:

$$h = 2 \cdot 26,5/19,5 = 2,72;$$

$$S_1 = 2 \cdot 40/19,5 = 4,10;$$

$$A = (2,72^2 + 4,10^2 + 1)/(2 \cdot 4,1) = 3,08;$$

$$B = (1 + 4,1^2)/(2 \cdot 4,1) = 2,17.$$

$$F_v = \frac{1}{3,14} \left[\frac{1}{4,1} \cdot \arctg \left(\frac{2,72}{\sqrt{4,1^2 - 1}} \right) + \frac{2,72}{4,1} \right] \times$$

$$\times \left\{ \arctg \left(\sqrt{\frac{4,1 - 1}{4,1 + 1}} \right) \right\} - \frac{3,08}{\sqrt{3,08^2 - 1}} \cdot \arctg \left(\sqrt{\frac{(3,08 + 1)(4,1 - 1)}{(3,08 - 1)(4,1 + 1)}} \right) = 0,00126;$$

$$F_H = \frac{1}{3,14} \left[\frac{(2,17 - 1)/4,1}{\sqrt{2,17^2 - 1}} \cdot \arctg \left(\sqrt{\frac{(2,17 + 1)(4,1 - 1)}{(2,17 - 1)(4,1 + 1)}} \right) \right] -$$

$$- \frac{(3,08 - 1)/4,1}{\sqrt{3,08^2 - 1}} \cdot \arctg \left(\sqrt{\frac{(3,08 + 1)(4,1 - 1)}{(3,08 - 1)(4,1 + 1)}} \right) = 0,03236;$$

$$F_q = \sqrt{0,00126^2 + 0,03236^2} = 0,03240.$$

4. Определяем коэффициент пропускания атмосферы по формуле (3.71):

$$\tau = \exp[-7,0 \cdot 10^{-4} (40 - 0,5 \cdot 19,5)] = 0,979.$$

5. Находим интенсивность теплового излучения q по (3.33), принимая $E_f = 47 \text{ кВт/м}^2$ в соответствии с табл. 3.3:

$$q = 47 \cdot 0,0324 \cdot 0,979 = 1,5 \text{ кВт/м}^2.$$

Ответ. Интенсивность теплового излучения при проливе бензина площадью 300 м^2 составляет $1,5 \text{ кВт/м}^2$.

Содержание работы

Задание

Рассчитать интенсивность теплового излучения при проливе горючего вещества площадью $S \text{ (м}^2\text{)}$ на расстоянии $r \text{ (м)}$ от эпицентра пролива.

Методические указания

1. Получите задание и исходные данные для выполнения расчета (табл. 3.16).
2. Изучите тепловое действие огненного шара (раздел 2.5).
3. Подробно изучите методику расчета интенсивности теплового излучения при проливе ЛВЖ и ГЖ (раздел 3.4).
4. Проанализируйте формулы (3.62)—(3.71), используемые для расчета параметров при попадании газов и паров горючих жидкостей в открытое пространство и находящихся в помещении.
5. Выполните расчеты по варианту задачи, согласованному с преподавателем.

б. Недостающие для расчетов данные примите по табл. 3.16 и по данным рассмотренного выше примера.

Таблица 3.16. Данные для расчета интенсивности теплового излучения

Вариант	Наименование горючего	Площадь пролива, S , m^2	Расстояние от эпицентра пролива, r , м	Удельная массовая скорость выгорания, m , $kg/(m^2 \cdot c)$
1	Метан (СПГ)	50	10	0,05
2	Метан (СПГ)	120	20	0,06
3	Пропан-бутан, смесь	150	10	0,04
4	Пропан-бутан, смесь	300	30	1,00
5	Керосин	130	20	1.10
6	Керосин	225	50	0,09
7	Бензин	300	40	0,05
8	Бензин	550	80	0,06
9	Дизельное топливо	150	10	0,12
10	Дизельное топливо	300	30	0,13
11	Дизельное топливо	450	60	0,50
12	Нефть	120	10	0,60
13	Нефть	180	55	0,10
14	Мазут	340	20	0,07
15	Битум	170	50	0,15

Содержание отчета

Отчет должен отвечать требованиям общих методических указаний по выполнению работ, иметь обоснованные выводы по результатам расчетов.

В отчете приведите результаты расчетов и ответы на контрольные вопросы.

Контрольные вопросы

1. От чего зависит интенсивность теплового излучения?
2. Какие методы используются для расчета интенсивности теплового излучения при пожарах?
3. Как определяют угловой коэффициент облученности?
4. От чего зависит высота пламени при пожаре проливов ЛВЖ и ГЖ?
5. Назовите наиболее пожароопасные ЛВЖ и ГЖ.

Практическая работа 16 РАСЧЕТ РАЗМЕРОВ ЗОНЫ, ОГРАНИЧЕННОЙ НИЖНИМ КОНЦЕНТРАЦИОННЫМ ПРЕДЕЛОМ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПЛАМЕНИ

Цель работы: освоить методику расчетов размеров зоны, ограниченной НКПР пламени, научиться пользоваться справочной и нормативной документацией.

Общие положения

При авариях происходит распространение горючих веществ и продуктов горения в радиусе определенной зоны. Горючие газообразные вещества представляют опасность возгорания и распространения пламени в зависимости от концентрационных пределов смесей этих газов с воздухом.

Рассмотрим расчет размеров зоны, ограниченной НКПР, на примере таких опасных горючих газов, как пропан и бутан.

Пропан:

- горючий бесцветный газ;
- молярная масса 44,096 кг · моль⁻¹;
- концентрационные пределы распространения пламени: нижний 2,3 %, верхний 9,4 %;
- максимальное давление взрыва 843 кПа.

Бутан:

- горючий бесцветный газ;
- молярная масса 58,123 кг · моль⁻¹;

- концентрационные пределы распространения пламени: нижний 1,8 %, верхний 9,1 %;
- максимальное давление взрыва 843 кПа.

Пример 1. Рассчитать размеры зоны, ограниченной НКПР при разрушении автоцистерны, перевозящей опасный газ в количестве 4880 кг. Автоцистерна находится на расстоянии 165 м до АЗС; 193 м до общежития; 238 м до кооперативного гаража.

Решение

Расчет производим для наиболее часто используемой смеси пропана и бутана — 50:50.

1. Определяем среднее значение НКПР для смеси — $\varphi_n = 2,05$ %.
2. Среднее значение молярной массы составляет:

$$(44,096 + 58,123)/2 = 51,1.$$

3. Плотность пропано-бутановой смеси определяем по формуле

$$\rho_{г(н)} = \frac{M}{V_0(1 + 0,00367t_p)},$$

где M — молярная масса, кг · кмоль⁻¹;

V_0 — молярный объем, равный 22,41 м³ · кмоль⁻¹;

t_p — расчетная температура, °С.

Принимаем максимальную температуру (например, для Иркутской области 37 °С).

Отсюда:

$$\rho_{г(н)} = \frac{51,1}{22,413(1 + 0,00367 \cdot 37)} = 2,0 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}.$$

4. Размер зоны, ограниченной нижним концентрационным пределом распространения пламени (НКПР) определяем по формуле (3.25).

Максимальная проектная авария: все содержимое цистерны падает в окружающее пространство. Количество газа в цистерне 4880 кг.

Отсюда находим размер зоны, ограниченной нижним концентрационным пределом распространения пламени, он равен:

$$R_{\text{НКПР}} = 14,5632 \left(\frac{4880}{2 \cdot 2,02} \right)^{0,333} = 154,7 \text{ м}.$$

Учитывая, что расстояния до АЗС — 165 м; до общежития — 193 м; до кооперативного гаража — 238 м, делаем вывод, что данные расстоя-

ния больше, чем радиус зоны, ограниченной нижним концентрационным пределом распространения пламени. Следовательно, при разрушении автомобильной цистерны смесь горючих газов не достигнет указанных объектов.

Пример 2. Рассчитать избыточное давление взрыва пропана на различных расстояниях. Количество пропана в цистерне 4880 кг. Согласно справочным данным теплота горения пропана равна $2044 \text{ кДж} \times \text{моль}^{-1}$, молярная масса $44,096 \text{ кг} \cdot \text{моль}^{-1}$.

Решение

1. Приведем теплоту горения к размерности $\text{кДж} \cdot \text{кг}^{-1}$:

$$\frac{2044}{M} = \frac{2044}{44,096 \cdot 10^{-3}} = 46,35 \cdot 10^3 \text{ кДж} \cdot \text{кг}^{-1}.$$

2. Плотность пропана при расчетной температуре определим по формуле

$$\rho_r = \frac{M}{V_0(1 + 0,00367t_p)},$$

где M — молярная масса, $\text{кг} \cdot \text{моль}^{-1}$;

V_0 — мольный объем, равный $22,41 \text{ м}^3 \cdot \text{кмоль}^{-1}$;

t_p — расчетная температура, $^{\circ}\text{C}$.

Отсюда имеем: плотность пропана при расчетной температуре t_p 37°C равна

$$\rho_r = \frac{44,096}{22,413(1 + 0,00367 \cdot 37)} = 1,73 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}.$$

3. Приведенную массу газа (пара) определим по формуле (3.29):

$$m_{\text{пр}} = \left(\frac{46,35 \cdot 10^6}{4,52 \cdot 10^6} \right) \cdot 4880 \cdot 0,1 = 5004,2 \text{ кг}.$$

4. Избыточное давление рассчитаем по формуле (3.28).

Избыточное давление на расстоянии 10 м от геометрического центра газозвушного облака составит:

$$\Delta p = 101 \left(\frac{0,8 \cdot 5004,2^{0,33}}{10} + \frac{3 \cdot 5004,2^{0,66}}{10^2} + \frac{5 \cdot 5004,2}{10^3} \right) = 3499 \text{ кПа}.$$

Избыточное давление на расстоянии 50 м от геометрического центра газоздушного облака составит:

$$\Delta p = 101 \left(\frac{0,8 \cdot 5004,2^{0,33}}{50} + \frac{3 \cdot 5004,2^{0,66}}{50^2} + \frac{5 \cdot 5004,2}{50^3} \right) = 80,6 \text{ кПа.}$$

Избыточное давление на расстоянии 100 м от геометрического центра газоздушного облака составит:

$$\Delta p = 101 \left(\frac{0,8 \cdot 5004,2^{0,33}}{100} + \frac{3 \cdot 5004,2^{0,66}}{100^2} + \frac{5 \cdot 5004,2}{100^3} \right) = 24,3 \text{ кПа.}$$

Избыточное давление на расстоянии 150 м от геометрического центра газоздушного облака составит:

$$\Delta p = 101 \left(\frac{0,8 \cdot 5004,2^{0,33}}{150} + \frac{3 \cdot 5004,2^{0,66}}{150^2} + \frac{5 \cdot 5004,2}{150^3} \right) = 13,4 \text{ кПа.}$$

Избыточное давление на расстоянии 200 м от геометрического центра газоздушного облака составит:

$$\Delta p = 101 \left(\frac{0,8 \cdot 5004,2^{0,33}}{200} + \frac{3 \cdot 5004,2^{0,66}}{200^2} + \frac{5 \cdot 5004,2}{200^3} \right) = 9,1 \text{ кПа.}$$

Избыточное давление на расстоянии 250 м от геометрического центра газоздушного облака составит:

$$\Delta p = 101 \left(\frac{0,8 \cdot 5004,2^{0,33}}{250} + \frac{3 \cdot 5004,2^{0,66}}{250^2} + \frac{5 \cdot 5004,2}{250^3} \right) = 6,9 \text{ кПа.}$$

Результаты расчетов сведем в табл. 3.17.

Таблица 3.17. Результаты расчета избыточного давления взрыва на различных расстояниях

Расстояние от геометрического центра газоздушного облака, м	Избыточное давления взрыва, кПа
10	3499
50	80,6
100	24,3
150	13,4
200	9,1
250	6,9

Содержание работы

Задание 1

Рассчитать избыточное давление взрыва на расстоянии r , м от геометрического центра аварии цистерны с жидким пропаном массой m (кг) при температуре 37°C .

2. Определить возможные повреждения объектов (расположение объектов взять из условий примера 1).

Методические указания

1. Получите задание и исходные данные для выполнения расчета (табл. 3.18).

Таблица 3.18. Исходные данные для расчета параметров взрыва

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Расстояние r , м	20	30	40	60	70	80	90	110	120	130
Масса горючего, m (кг)	4000	4100	4200	4300	4400	4500	4600	4700	4800	4880
Вариант	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Расстояние r , м	140	160	170	180	190	210	220	230	240	300
Масса горючего m , кг	3950	3900	3850	3880	4450	4560	4650	4760	4850	4900

2. Подробно изучите методику расчета размеров зоны, ограниченной НКПР (пример 1).

3. Внимательно изучите методику расчета избыточного давления взрыва на различных расстояниях от геометрического центра взрыва (пример 2).

4. Выполните расчеты по вариантам, согласованным с преподавателем.

5. Необходимые данные для расчетов примите из примеров 1 и 2.

Содержание отчета

Отчет должен отвечать требованиям общих методических указаний по выполнению работ, иметь обоснованные выводы по результатам расчетов. В отчете приведите результаты расчетов и ответы на контрольные вопросы.

Контрольные вопросы

1. Что такое «избыточное давление взрыва»?
2. Как рассчитывают избыточное давление взрыва?
3. Что понимается под концентрационными пределами распространения пламени? От чего они зависят?

Практическая работа 17 РАСЧЕТ ИЗБЫТОЧНОГО ДАВЛЕНИЯ ВЗРЫВА В ПРОИЗВОДСТВЕННОМ ПОМЕЩЕНИИ

Цель работы: освоить методики расчета избыточного давления в производственном помещении.

Общие положения

Определение избыточного давления взрыва в производственном помещении зависит от множества факторов. Рассмотрим на примере одного технологического узла метод расчета избыточного давления взрыва.

Пример. Технологическая схема производства дегидрокверцетина в помещении состоит из одного технологического цикла. Технологический цикл основан на извлечении дегидрокверцетина из щепы ливственницы путем экстракций 70%-ным раствором ацетона при температуре окружающей среды.

Помещение, в котором находятся отделение сборников, экстракционное и реакторное отделения, представляет наибольшую пожарную опасность, так как в технологическом процессе обращается ацетон. Наибольшее количество ацетона в сборнике при нормальном режиме составляет 1500 л, что занимает объем $1,5 \text{ м}^3$.

Параметры производственного помещения: площадь 1658 м^2 , высота 10 м. Помещение оборудовано аварийной вентиляцией с кратностью 5 ч^{-1} .

По справочным данным определяем показатели пожарной опасности для ацетона (брутто формула $\text{C}_3\text{H}_6\text{O}$).

Теплота горения ацетона $1821,38 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1}$; температура вспышки — $18 \text{ }^\circ\text{C}$; молярная масса $58,08 \text{ кг/моль}$; плотность ацетона $790,8 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$; максимальное давление взрыва 572 кПа .

В качестве расчетного варианта принимаем наиболее опасный вариант развития аварии — разрушение сборника ацетона. При разрушении площадь разлива составит 1500 м^2 (согласно НПБ 105—03 и СП 12.13130.2009 принимается: 1 л горючего разливается на 1 м^2). Максимальную температуру воздуха принимаем $37 \text{ }^\circ\text{C}$, при разгерметизации оборудования возможно образование взрывоопасного облака и возникновение взрыва.

Решение

Для определения избыточного давления взрыва предварительно определяем давление насыщенных паров при температуре $37 \text{ }^\circ\text{C}$.

1. Давление насыщенных паров рассчитывали по уравнению Антуана:

$$p_{\text{н}} = 10^{\frac{A - B}{C + t}},$$

где A, B, C — константы Антуана (табл. 10, прил. III);

t — расчетная температура, $^\circ\text{C}$.

Для ацетона константы Антуана следующие:

$$A = 7,25058; B = 1281,721; C = 237,088.$$

Давление насыщенных паров составляет:

$$p_{\text{н}} = 10^{7,25058 - \frac{1281,721}{237,088 + 37}} = 375 \text{ Па} = 0,375 \text{ кПа}.$$

2. Определяем интенсивность испарения по формуле (3.13):

$$\begin{aligned} W &= 10^{-6} \cdot 1,3 \cdot \sqrt{58,08} \cdot 375 \cdot 10^3 = \\ &= 3,71 \cdot 10^{-6} \text{ кг} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{м}^{-2}. \end{aligned}$$

Скорость воздушного потока определяем по формуле

$$v = \frac{A_{\text{в}} V}{3600 F},$$

где $A_{\text{в}}$ — кратность аварийной вентиляции, ч^{-1} ;

V — объем помещения, м^3 ;

F — площадь поперечного сечения объема помещения: произведение ширины на высоту, м^2 .

Объем помещения $V = Sh = 1658 \cdot 10 = 16\,580 \text{ м}^3$, $F = ah = 48 \cdot 10 = 480 \text{ м}^2$.

Поэтому

$$v = \frac{5 \cdot 16\,580}{3600 \cdot 480} = 0,05 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}.$$

3. Величина интенсивности испарения позволяет рассчитать массу паров (m_n , кг), поступивших в открытое пространство за заданное время испарения исходя из зависимости (3.12).

Принимаем согласно НПБ 105—95 время испарения 3600 с. Площадь разлива 1500 м^2 (1 л разливается на 1 м^2), следовательно, $F_n = 1500 \text{ м}^2$.

Масса испарившихся паров равна по (3.12):

$$m_n = 3,71 \cdot 10^{-6} \cdot 1500 \cdot 3600 = 20,034 \text{ кг}.$$

В сборнике находится $P = \rho V = 790,8 \cdot 1,5 = 1186,2 \text{ кг}$ горючего вещества, что превышает расчетную величину, следовательно, принимаем количество испарившихся паров $1186,2 \text{ кг}$.

4. Время полного испарения, с, определяют из выражения (3.12):

$$\tau = \frac{m_n}{W F_n},$$

где m_n — масса паров, кг.

W — интенсивность испарения, $\text{кг} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{м}^{-2}$;

F_n — площадь испарения, м^2 ;

Время полного испарения составляет:

$$\tau = \frac{1186,2}{3,71 \cdot 10^{-6} \cdot 1500} = 213\,153 \text{ с}.$$

5. Так как помещение оборудовано аварийной вентиляцией, определяем количество аккумулированных паров (m_n^* , кг) по формуле (3.14):

$$m_n^* = \frac{1186,2}{1 + \frac{5 \cdot 213\,153}{3600}} = 3,99 \text{ кг}.$$

6. Рассчитываем стехиометрический коэффициент кислорода в реакции сгорания по формуле (3.4):

$$\beta = 3 + \frac{6}{4} - \frac{1}{2} = 4.$$

7. Рассчитываем стехиометрическую концентрацию паров ацетона по формуле (3.3):

$$\varphi_{\text{сх}} = \frac{100}{1 + 4,84 \cdot 4} = 4,9 \%$$

8. Плотность пара ацетона при расчетной температуре вычисляем по формуле (3.2). В качестве расчетной температуры следует принять максимально возможную температуру воздуха в данном помещении в соответствующей климатической зоне или максимально возможную температуру воздуха по технологическому регламенту с учетом возможного повышения температуры в аварийной ситуации. Если такого значения расчетной температуры t_p по каким-либо причинам определить не удастся, допускается принимать ее равной 61°C ;

Примем максимальную температуру воздуха 37°C ,

$$\rho_{r(n)} = \frac{58,08}{22,413(1 + 0,00367 \cdot 37)} = 2,28 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}.$$

9. Избыточное давление взрыва рассчитываем по формуле (3.1), в которой Z принимаем по табл. 3.1 (для ЛВЖ $Z = 0,3$).

Определяем величину свободного объема помещения:

$$V_{\text{св}} = 0,8Sh = 0,8 \cdot 1658 \cdot 10 = 13\,264 \text{ м}^3.$$

Определяем избыточное давление взрыва по (3.1):

$$\Delta p = (572 - 100) \frac{369,1 \cdot 0,3}{13264 \cdot 2,28} \cdot \frac{100}{4,9} \cdot \frac{1}{3} = 11,7 \text{ кПа}.$$

Ответ. Избыточное давление взрыва паров ацетона в помещении, где находятся отделение сборников, экстракционное и реакторное отделения составляет $11,7 \text{ кПа}$.

Содержание работы

Задание

Рассчитать избыточное давление при взрыве емкости с сжиженным углеводородом и проливе его из емкости, если произошло полное разрушение оборудования. Максимальное давление в емкости P_{max} (кПа); максимальное количество углеводорода в емкости m (л); площадь помещения S (м^2); высота помещения h (м); ширина a (м).

Помещение оборудовано аварийной вентиляцией с кратностью воздухообмена A_B (ч^{-1}).

Таблица 3.19. Данные для расчетов

Вариант	1	2	3	4	5
СУВ	Ацетон	Метанол	Этанол	Бутанол	Бензол
$p_{\text{мах}}$, кПа	902	910	890	880	800
m , л	1000	1100	1500	1550	900
S , м^2	800	1000	920	980	1220
h , м	10	10	8	8	6
a , м	40	42	44	46	48
A_B , ч^{-1}	3	4	5	6	4,5
Вариант	6	7	8	9	10
СУВ	Гексан	Пропанол	трет-Бутанол	н-Амиловый спирт	Диэтиловый эфир
$p_{\text{мах}}$, кПа	820	840	860	880	900
m , кг	1100	1300	1500	1600	2000
S , м^2	700	745	770	820	840
h , м	10	12	14	16	8
a , м	32	34	36	38	40
A_B , ч^{-1}	3,5	4,5	5,1	6,3	5

Методические указания

1. Получите задание и исходные данные для выполнения расчетов (табл. 3.19).

2. Подробно изучите методику расчета избыточного давления взрыва технологического узла на указанном в разделе примере.

3. Ознакомьтесь с данными НПБ 105—03 «Определение категорий помещений и зданий по взрывопожарной и пожарной опасности» и СП 12.13130.2009 «Определение категорий помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности».

4. Площадь разлива примите исходя из того, что 1 л жидкости разливается на площадь 1 м^2 .

5. Недостающие для расчетов данные — физико-химические константы на горючие жидкости, примите по табл. 3 и 18, прил. III.
6. Выполните расчеты по варианту задания и подготовьте отчет.

Содержание отчета

Отчет должен отвечать требованиям общих методических указаний по выполнению работ, иметь обоснованные выводы по результатам расчетов.

В отчете приведите результаты расчетов и ответы на контрольные вопросы.

Контрольные вопросы

1. Что понимается под избыточным давлением взрыва?
2. Как рассчитывают избыточное давление взрыва?
3. Как влияют условия среды (пространства), в которой осуществляется взрыв, на его параметры? Поясните примерами.

Формулы, используемые при решении задач

1. Материальный баланс процессов горения

Теоретически необходимый расход воздуха (V_B^o)

Тип горючих веществ	Расчетная формула	Размерность
Индивидуальное вещество	$V_B^o = \frac{n_{O_2} + n_{N_2}}{n_r} \quad (1.67)$ $V_B^o = \frac{(n + 3,76n) \cdot 22,4}{mM} = \frac{106,6n}{mM} \quad (1.64)$	$\frac{\text{кмоль}}{\text{кмоль}}; \frac{\text{м}^3}{\text{м}^3}; \frac{\text{м}^3}{\text{кг}}$
Вещество сложного состава	$V_B^o = 0,269 \left(\frac{C}{3} + H + \frac{S-O}{8} \right) \quad (1.72)$	$\frac{\text{м}^3}{\text{кг}}$
Смесь газов	$V_B^o = \frac{2 [CH_4] + 0,5 [H_2] + 0,5 [CO] + 1,5 [H_2S] - [O_2]}{21} \quad (1.73)$	$\frac{\text{м}^3}{\text{м}^3}; \frac{\text{кмоль}}{\text{кмоль}}$

Объем воздуха при заданных условиях:

$$V_B = \frac{V_B^o \cdot E \cdot 760}{273p} = 2,784 \cdot \frac{V_B^o T}{p}, \text{ м}^3. \quad (1.66)$$

Коэффициент избытка воздуха

$$\alpha = \frac{V_{B, \text{пр}}}{V_B^o}; \quad (1.4)$$

$$\alpha = 1 + \frac{\varphi_{O_2} V_{\text{п.г}}^o}{V_B^o (21 - \varphi_{O_2})}; \quad (1.5)$$

$$\alpha = \frac{21}{21 - \varphi_{O_2}} ; \quad (1.6)$$

$$\alpha = \frac{21}{21 - \varphi_{O_2} + 0,5\varphi_{CO_2} + 0,5\varphi_{H_2} + 2\varphi_{CH_4}} . \quad (1.7)$$

Объем продуктов сгорания

Тип горючих веществ	Расчетная формула	Размерность
Индивидуальное вещество	Теоретический объем продуктов горения: $V_{п.г}^0 = \frac{V_0 \sum n_{п.г.i}}{n_r M} . \quad (1.75)$	$\frac{м^3}{кг}, \frac{м^3}{м^3};$ $\frac{кмоль}{кмоль}$
	Теоретический объем продуктов горения газообразных горючих: $V_{п.г}^0 = \frac{\sum n_{п.г.i}}{n_r} . \quad (1.76)$	
	Объем влажных продуктов горения: $V_r = \frac{(m_{CO_2} + m_{H_2O} + m_{N_2})22,4}{mM} . \quad (1.74)$	
	Объем продуктов горения при заданных условиях: $V_{п.г} = \frac{V_{п.г}^0 \cdot p \cdot T^r}{p^0 \cdot T^0} \quad (1.77)$	
Вещество сложного состава	Объем компонентов продуктов горения: $V_{CO_2} = 186 \frac{C}{100} ; \quad (1.80)$	$\frac{м^3}{кг}$
	$V_{H_2O} = 112 \frac{H}{100} + 124 \frac{W}{100} ; \quad (1.81)$	
	$V_{SO_2} = 0,7 \frac{S}{100} ; \quad (1.82)$	
	$V_{N_2} = \frac{1}{100} \left[7C + 21 \left(H - \frac{O}{8} \right) + 2,63S + 0,8N \right] \quad (1.83)$	
Смесь газов	Теоретический объем продуктов горения смеси газов: $V_{п.г}^0 = \sum V_{п.г.i} . \quad (1.84)$	$\frac{м^3}{м^3}$
	Объем <i>i</i> -го продукта: $V_{п.г.i} = \frac{1}{100} \left[\frac{\sum n_{п.г.i} \varphi_{гi}}{n_r} + \sum \varphi_{пдi} \right] \quad (1.85)$	

Практический (полный) объем продуктов горения

$$V_{п.г} = V_{п.г}^o + \Delta V_B, \text{ м}^3. \quad (1.11)$$

Практический объем продуктов горения

$$V_{п.г} = V_{п.г}^o + V_B^o (\alpha - 1), \text{ м}^3. \quad (1.12)$$

Объем кислорода в продуктах горения

$$V_{O_2} = 0,21 \Delta V_B, \text{ м}^3. \quad (1.15)$$

Объем азота в продуктах горения

$$V_{N_2} = V_{N_2}^o + 0,79 \Delta V_B, \text{ м}^3. \quad (1.16)$$

Теоретический объем азота в продуктах горения

$$V_{N_2}^o = 0,79 V_B^o, \text{ м}^3. \quad (1.17)$$

2. Тепловой баланс процесса горения

Тип горючих веществ	Расчет теплоты сгорания	Размерность
Индивидуальные вещества	<p>Низшая теплота горения:</p> $Q_H = \sum_{i=1}^k (\Delta H_{f_{п.г_i}} \cdot m_i) - \Delta H_{f_r} n_r \quad (1.23)$	кДж/моль
Вещества сложного состава (формула Менделеева)	<p>Высшая теплота горения:</p> $Q_B = 339,4 [C] + 1257 [H] - 108,9 ([O] - [S]); \quad (1.24)$ <p>Низшая теплота горения:</p> $Q_H = 339,4C + 1257H - 108,9(O - S) - 25,1(9H + W) \quad (1.25)$	кДж/кг
Смесь газов	<p>Низшая теплота горения</p> $Q_H = \frac{1}{100} \sum Q_{Hi} \Phi_i \quad (1.26)$	кДж/моль, кДж/м ³

Удельная скорость (интенсивность) тепловыделения

$$q = Q_H v_M, \text{ кВт/м}^2. \quad (1.27)$$

Интенсивность тепловыделения

$$Q = Q_H v_M F, \text{ кВт}. \quad (1.28)$$

3. Концентрационные пределы распространения пламени

Концентрационные пределы воспламенения нижний (верхний) индивидуальных горючих веществ (z/m^3)

$$C_{н(в)} = \frac{100}{a \cdot n + b} \quad (1.98)$$

Число атомов кислорода, необходимое для полного сгорания одной молекулы вещества

$$n = 2(n_C + n_S) + \frac{n_H - n_X}{2} - n_O \quad (1.99)$$

Формула Ле-Шателье

$$\varphi_n = \frac{100}{\frac{\varphi_1}{\varphi_{m_1}} + \frac{\varphi_2}{\varphi_{m_2}} + \dots + \frac{\varphi_m}{\varphi_{m_m}}} \quad (1.100)$$

Расчет концентрационных пределов (нижнего) по теплоте горения

$$\varphi_n = \frac{Q_{пр} \cdot 100}{Q_H} \quad (1.101)$$

Расчет концентрационных пределов воспламенения по давлению насыщенных паров жидкости

$$\varphi_{н(в)} = \frac{p_{н(в)} \cdot 100}{p_0} \quad (1.105)$$

Уравнение Антуана (расчет давления насыщенного пара)

$$\lg p = A - \frac{B}{C + t} \quad (1.44)$$

Расчет концентрационных пределов при различных температурах

$$\varphi_{н(T_2)} = \varphi_{н(T_1)} \left(1 - \frac{T_2 - T_1}{T_f - T_1} \right); \quad (1.106)$$

$$\varphi_{в(T_2)} = \varphi_{в(T_1)} \left(1 + \frac{T_2 - T_1}{T_f - T_1} \right). \quad (1.107)$$

4. Температурные пределы распространения пламени

$$T_{\text{нТПВ}} = 0,82 t_{\text{к}} - 86 \text{ К}; \quad (1.103)$$

$$T_{\text{вТПВ}} = 0,70 t_{\text{к}} - 42 \text{ К}. \quad (1.104)$$

5. Температура горения (К)

$$T_{\text{г}} = T_{\text{о}} + \frac{Q_{\text{п.г}} - Q_{\text{исх}}}{\sum_{i=1}^k V_{\text{п.г}} \cdot C_{p_i}}. \quad (1.29)$$

Адиабатическая температура горения

$$T_{\text{г}} = T_{\text{о}} + \frac{Q_{\text{н}}}{\sum C_{p_i} \cdot V_{\text{п.г}}^{\text{о}}}. \quad (1.31)$$

Действительная температура горения

$$T_{\text{г.д}} = T_{\text{о}} + \frac{Q_{\text{п.г}}}{\sum C_{p_i} \cdot V_{\text{п.г}}}. \quad (1.32)$$

Температура горения, рассчитанная методом интерполяции

$$T_{\text{г}} = T_1 + \frac{(Q_{\text{н(п.г)}} - Q'_{\text{п.г}})(T_2 - T_1)}{Q''_{\text{п.г}} - Q'_{\text{п.г}}}. \quad (1.89)$$

6. Температура самовоспламенения

$$\lg t = A_{\text{п}} + n_{\text{п}} \lg S; \quad (1.96)$$

$$\lg t = A_{\text{в}} - n_{\text{в}} \lg \tau; \quad (1.97)$$

$$T_{\text{св}} = 300 + 116 \sqrt{5 - l_{\text{ср}}}, \text{ при } l_{\text{ср}} \leq 5; \quad (1.94)$$

$$T_{\text{св}} = 300 + 38 \sqrt{l_{\text{ср}} - 5}, \text{ при } l_{\text{ср}} > 5. \quad (1.95)$$

Средняя длина цепи в молекуле соединения

$$\lambda_{\text{ср}} = \frac{\sum_{i=1}^n n_i c_i}{\sum n_i} . \quad (1.92)$$

Общее число цепей в молекуле соединения

$$\sum n_i = \frac{M(M-1)}{2} . \quad (1.93)$$

7. Температура вспышки

Формула В.И. Блинова

$$T_{\text{всп}} = \frac{A}{P_{\text{нп}} Dn} . \quad (1.34)$$

Коэффициентов диффузии (м²/с)

$$D_0 = \frac{10^{-4}}{\sqrt{\sum \Delta M_i \mu_i}} . \quad (1.35)$$

Температура вспышки жидкостей с определенными видами связей (°С)

$$T_{\text{всп}} = a_0 + a_1 t_{\text{кип}} + \sum_{j=2}^n a_j l_j , \quad (1.37)$$

Температура вспышки по давлению насыщенного пара (°С)

$$T_{\text{всп}} = \frac{A_B}{p_{\text{всп}} D_0 \beta} - 273 . \quad (1.38)$$

Температура вспышки в закрытом тигле (формула Эля) (°С)

$$T_{\text{всп}} = t_{\text{кип}} - 18\sqrt{k} ; \quad (1.40)$$

$$k = 4m_C + m_H + 4m_S + m_N - 2m_O - 2m_{Cl} - 3m_F - 5m_{Br} .$$

Температура вспышки смесей нефтепродуктов (°C)

$$t_{\text{всп}} = \frac{A \times t_a + B \times t_b - f(t_a - t_b)}{100}. \quad (1.111)$$

8. Температура воспламенения

Температура воспламенения индивидуальных жидкостей (°C)

$$T_b = a_0 + a_1 t_{\text{кип}} + \sum_{j=2}^n a_j I_j. \quad (1.37)$$

Температура воспламенения по давлению насыщенного пара (°C)

$$T_b = \frac{A_b}{P_{\text{всп}} D_0 \beta} - 273. \quad (1.41)$$

Температура воспламенения алифатических спиртов и сложных эфиров (°C)

$$T_b = -\frac{t_{\text{кип}} + 273}{1 + K(t_{\text{кип}} + 273)} - 273. \quad (1.42)$$

9. Стехиометрическая концентрация

Стехиометрическая концентрация горючего пара или газа при горении на воздухе (% об.)

$$\varphi_{\text{сх}} = \frac{100}{4,76\beta + 1}. \quad (1.113)$$

Стехиометрическая концентрация горючего пара или газа при горении в чистом кислороде (% об.)

$$\varphi_{\text{сх}} = \frac{100}{\beta + 1}. \quad (1.114)$$

Стехиометрическая концентрация горючего пара или газа при горении в чистом кислороде (г/м³)

$$\varphi'_{\text{сх}} = \frac{1000 M}{(\beta + 1) V_r}. \quad (1.116)$$

10. Горение твердых веществ и материалов

Приведенная массовая скорость выгорания, кг/м² · с

$$W_{\text{п.п}} = W \cdot K_{\text{п}};$$

$$K_{\text{п}} = \frac{S_{\text{п.г}}}{S_{\text{пож}}}. \quad (1.47)$$

Пожарная нагрузка (массовая), кг/м²

$$P_{\text{п.н}} = \frac{\sum_{i=1}^n M_i}{S}. \quad (1.48)$$

Пожарная нагрузка (тепловая), МДж/м²

$$q_{\text{п.н}} = \frac{\sum_{i=1}^n Q_{\text{п}_i}}{S}. \quad (1.49)$$

Коэффициент поверхности горения, м²/м²

$$K_{\text{п}} = \frac{S_{\text{п.г}_i}}{S_{\text{п}_i}}. \quad (1.51)$$

Коэффициент поверхности горения пожарной нагрузки, м²/м²

$$K_{\text{п}} = \frac{\sum_{i=1}^n S_{\text{п.г}_i}}{S}. \quad (1.52)$$

Массовая скорость выгорания пожарной нагрузки кг/с

$$v_m = \frac{\Delta M}{\Delta \tau}. \quad (1.54)$$

Приведенная массовая скорость выгорания, кг/(м² · с)

$$v_m^{\text{пр}} = \frac{\Delta M}{\Delta \tau S_{\text{п}}}. \quad (1.55)$$

Удельная скорость выгорания (истинная), кг/(м² · с)

$$v_m^{уд} = \frac{\Delta M}{\Delta \tau S_{п.г}}; \quad (1.56)$$

$$v_m^{пр} = \frac{v_m}{S_{п}}; \quad (1.57)$$

$$v_m^{уд} = \frac{v_m}{S_{п.г}}; \quad (1.58)$$

$$v_m^{пр} = v_m^{уд} K_{п}. \quad (1.59)$$

Линейная скорость распространения пламени по поверхности пожарной нагрузки, м/мин

$$v_{л} = \frac{\Delta L}{\Delta \tau}. \quad (1.60)$$

11. Параметры взрыва

Давление взрыва, Па

$$p_{взр} = \frac{p_o T_{взр}}{T_o} \cdot \frac{\sum n_i}{\sum n_{см}}. \quad (3.58)$$

Максимальное давление при взрыве, Па

$$p_{max} = p_o T_r n_k / T_o n_n. \quad (2.1)$$

Диаметр огненного шара, м

$$d_s = 55 \sqrt[3]{m_y}; \quad (2.5)$$

$$d_s = 3,86 m^{0,320}. \quad (2.11)$$

Время существования огненного шара, с

$$\tau_s = 3,8 \sqrt[3]{m_y}; \quad (2.6)$$

$$\tau_s = 0,299 m^{0,320}. \quad (2.12)$$

Излучательная мощность огненного шара, Вт

$$P_{и} = 12,4 \cdot 10^9 \cdot m_y^{2/3} \cdot 0,3 = 3,72 \cdot 10^9 \cdot m_y^{2/3}. \quad (2.14)$$

Избыточное давление индивидуальных горючих веществ, Па

$$\Delta p = (p_{\max} - p_0) \cdot \frac{m \cdot Z}{V_{\text{св}} \cdot \rho_{\text{гп}} \cdot \varphi_{\text{сх}}} \frac{100}{K_{\text{н}}} \cdot \frac{1}{K_{\text{н}}} . \quad (3.1)$$

Избыточное давление в открытом пространстве, Па

$$\Delta p = p_0 \left(\frac{0,8 m_{\text{пр}}^{0,33}}{r} + \frac{5 m_{\text{пр}}^{0,66}}{r^2} + \frac{5 m_{\text{пр}}}{r^3} \right) . \quad (3.28)$$

Внутренняя энергия, Дж

$$Q_{\text{вн.эн.см}} = \sum_{i=1}^N n_i C_i T . \quad (3.54)$$

Теплота взрыва, Дж

$$Q_{\text{взр}} = (Q_{\text{г.в}} n_{\text{г.в}} + Q_{\text{вн.эн}}) . \quad (3.56)$$

Приведенная масса газа или пара, кг

$$m_{\text{пр}} = \left(\frac{Q_{\text{сг}}}{Q_0} \right) \cdot m \cdot Z . \quad (3.29)$$

Импульс ударной волны, Па · с

$$i = 123 \frac{m_{\text{пр}}^{0,66}}{r} . \quad (3.30)$$

Обозначения

Давление

p_0 — давление при нормальных условиях, Па, кПа

p — заданное давление, мм. рт. ст., Па, кПа;

Δp — избыточное давление, кПа;

$p_{н.п}$ — давление насыщенного пара при температуре вспышки, температуре воспламенения;

$p_{всп}$ — парциальное давление пара исследуемой жидкости при температуре вспышки, кПа;

$p_{в}$ — парциальное давление пара исследуемой жидкости при температуре воспламенения, кПа;

$p_{н(в)}$ — давление насыщенного пара, соответствующее нижнему (верхнему) концентрационному пределу воспламенения;

$p_{взр}$ — давление взрыве, кПа;

p_{max} — максимальное давление взрыва стехиометрической газовой-душной или паровоздушной смеси в замкнутом объеме, кПа;

$p_{дин}$ — динамическое давление воздушного потока, следующего за фронтом ударной волны;

L — уровень звукового давления, дБ.

Температура

T_0 — начальная температура исходной смеси, К;

T — температура горючего вещества, К;

t — температура горючего вещества, °С;

T_r — температура горения, К;

$T_{св}$ — температура самовоспламенения, К;

$T_{всп}$ — температура вспышки, К;

$T_{в}$ — температура воспламенения, К;

$t_{кип}$ — температура кипения жидкости, °С;

T_r^P — адиабатическая температура горения стехиометрической смеси с воздухом при постоянном объеме, К;

$T_{взр}$ — температуре взрыва.

Пределы воспламенения

$t_{н(в)}$ — нижний (верхний) температурный предел воспламенения, °С;

$\Phi_{н(в)}$ — нижний (верхний) концентрационный предел воспламенения, % об.;

$c_{н(в)}$ — нижний (верхний) концентрационный предел воспламенения, г/м³;

Φ_v — область воспламенения, % об.;

$\Phi_{н(T_1)}, \Phi_{н(T_2)}$ — нижний концентрационный предел воспламенения при температуре T_1 и T_2 ;

$\Phi_{в(T_1)}, \Phi_{в(T_2)}$ — верхний концентрационный предел воспламенения при температурах T_1 и T_2 ;

$\Phi_{ф}$ — минимальная флегматизирующая концентрация.

Величины скорости

W — удельная массовая скорость выгорания (с единицы поверхности), кг/м² · с;

$W_{п.р}$ — приведенная удельная массовая скорость выгорания, кг/м² · с;

v_m — массовая скорость выгорания пожарной нагрузки (масса горючего, выгорающего в единицу времени), кг/с;

$v_m^{пр}$ — приведенная массовая скорость выгорания (масса горючего, выгорающая в единицу времени с единицы площади пожара), кг/(м² · с);

$v_m^{уд}$ — удельная скорость выгорания (истинная) (масса горючего, выгорающая в единицу времени с единицы поверхности), кг/(м² · с);

v_l — линейная скорость распространения пламени по поверхности пожарной нагрузки.

Объемные величины

V — объем, м³;

V_o — объем воздуха при нормальных условиях, м³;

V_v^o — теоретически необходимое количество воздуха для сгорания 1 кг или 1 м³ горючего вещества, м³/кг, м³/м³;

V_B — практическое количество воздуха, потраченное на сгорание единицы массы или единицы объема горючего вещества, м³/кг, м³/м³;

V_{Γ} — объем влажных продуктов сгорания при нормальных условиях, м³/кг;

$V_{\text{пт}}^0$ — теоретический объем продуктов сгорания, м³/кг;

$V_{\text{CO}_2}, V_{\text{H}_2\text{O}}, V_{\text{SO}_2}, V_{\text{N}_2}$ — объем газов выделяющихся при сгорании сложных горючих веществ, м³/кг, кмоль/кг;

$V_{\text{п.}i}$ — объем i -го компонента (продукты реакции), м³/м³, кмоль/кмоль, м³/кг;

$V_{\text{св}}$ — свободный объем помещения, м³;

V_a — объем газа, вышедшего из аппарата, м³;

V_m — объем газа, вышедшего из трубопровода, м³.

Массовые (количественные) величины

m — масса горючего, кг;

$m_{\text{пр}}$ — приведенная масса газа или пара, кг;

ΔM_i — атомные (элементные) составляющие горючего вещества;

M_i — масса i -го элемента горючего материала;

M_B — масса воздуха, пошедшая на горение, кг;

$m_{\text{CO}_2}, m_{\text{H}_2\text{O}}, m_{\text{N}_2}$ — число киломолей диоксида углерода, паров воды и азота в уравнении реакции горения;

$m_C, m_S, m_H, m_X, m_O, m_P$ — число атомов, соответственно, углерода, серы, водорода, галоида, кислорода и фосфора в молекуле жидкости.

n_{Γ} — количество горючего, кмоль;

$n_C, n_S, n_H, n_N, n_O, n_{\text{Cl}}, n_{\text{F}}, n_{\text{Br}}$ — соответственно число атомов углерода, серы, водорода, азота, кислорода, хлора, фтора и брома в молекуле данного вещества;

[C], [H], [S], [O] — содержание углерода, водорода, серы и кислорода в горючем веществе, масс. %;

$n_{\text{п.}i}$ — количество i -го продукта горения в уравнении реакции, кмоль;

n_k — число молей газообразных продуктов горения;

n_H — число молей исходной газовой смеси;

m_p — масса жидкости, испарившейся с поверхности разлива, кг;

$m_{\text{емк}}$ — масса жидкости, испарившейся с поверхностей открытых емкостей, кг;

$m_{\text{св.окр}}$ — масса жидкости, испарившейся с поверхностей, на которые нанесен применяемый состав, кг;

$m_{\text{пер}}$ — масса жидкости, испарившейся в окружающее пространство в случае ее перегрева, кг.

Концентрация

$C_{\text{сх}}$ — стехиометрическая концентрация паров ЛВЖ, г/м³;

$\varphi_{\text{сх}}$ — стехиометрическая концентрация, % об.;

$n_{\text{г}}, m_i$ — стехиометрические коэффициенты в уравнении реакции горения;

$\Phi_{\text{N}_2}, \Phi_{\text{O}_2}$ — концентрация азота, кислорода в окислительной среде (% об.)

Плотность

$\rho_{\text{в}}$ — плотность воздуха, кг · м⁻³;

$\rho_{\text{ТВ}}$ — плотность материала, на поверхность которого разливается СУГ, кг · м⁻³;

$\rho_{\text{п}}$ — плотность паров ЛВЖ при расчетной температуре и атмосферном давлении, кг · м⁻³;

$\rho_{\text{с}}$ — плотность воздуха при давлении сжатия, кг · м⁻³.

Площадь

S — площадь пола помещения м²;

$S_{\text{п.г}}$ — поверхность горения, м²;

$S_{\text{пож}}$ — площадь пожара, м²;

$S_{\text{пi}}$ — площадь пожара элемента пожарной нагрузки, м²;

$S_{\text{п.гi}}$ — поверхность горения i -го изделия;

$F_{\text{и}}$ — площадь испарения, м²;

$F_{\text{исп}}$ — площадь испарения, м².

Тепловые величины

$\Delta H_{\text{фн.гi}}; \Delta H_{\text{г}}$ — соответственно стандартные теплоты образования i -го продукта горения (п.г) и горючего (г), кДж/моль, кДж/м³;

$Q_{\text{п}}$ — количество теплоты, выделяемое i -м горючим материалом, Дж;

$Q_{\text{гор}}$ — теплота горения данного вещества; кДж/моль, кДж/кг, кДж/м³;

$Q_{\text{н}}$ — низшая теплота горения, кДж/кг;

- Q_v — высшая теплота горения, кДж/кг;
 Q_y — теплота горения углеводорода, кДж/кг;
 $Q_{\text{вн.эн.см}}$ — внутренней энергии взрывчатой паро-, газовой смеси, кДж;
 $Q_{\text{п.г}}$ — количество теплоты, затраченной на нагрев продуктов горения, кДж/моль; кДж/кг; кДж/м³;
 $Q_{\text{исх}}$ — количество теплоты, поступившее в зону горения с горючим и окислительной средой, кДж/моль; кДж/кг; кДж/м³;
 $Q_{\text{недож}}$ — теплота недожога, кДж/кг;
 $Q_{\text{пот}}$ — тепло потери излучением, кДж/кг;
 $L_{\text{исп}}$ — удельная теплота испарения жидкости при температуре перегрева жидкости T_a , Дж · кг⁻¹.
 $C_{\text{тв}}$ — теплоемкость материала, на поверхность которого разливается СУГ, Дж · кг⁻¹ · К⁻¹;
 C_{p_i} — удельная теплоемкость i -го компонента продуктов горения при T_1 , кДж/(м³ · К), кДж/(кмоль · К);
 C_1, C_2, C_n — удельная теплоемкость компонентов взрывчатой горючей смеси, ккал/(моль · град);
 C_p — мольная теплоемкость при постоянном давлении, кДж/(кмоль · К);
 C_{v1}, C_{v2}, C_{v3} — мольные теплоемкости каждого компонента смеси при постоянном объеме, кДж/(кмоль · К);
 q — интенсивность теплового излучения, кВт · м⁻²,
 $E_{\text{из}}$ — энергия, выделяющаяся при изоэнтропическом расширении среды, находящейся в резервуаре, Дж;
 $Q_{\text{сг}}$ — удельная теплота горения газа или пара, Дж/кг;
 $P_{\text{и}}$ — излучающая мощность, Вт;
 J — интенсивность тепловой энергии, кВт/м².

Коэффициенты

- β — стехиометрический коэффициент кислорода в реакции горения;
 α — коэффициент избытка воздуха;
 n — стехиометрический коэффициент при кислороде — количество молей кислорода, необходимое для полного окисления одного моля горючего вещества;
 D_0 — коэффициент диффузии пара в воздухе при нормальной температуре, см² · с⁻¹;

- D — коэффициент диффузии паров горючего вещества, $\text{см}^2 \cdot \text{с}^{-1}$;
 $K_{\text{п}}$ — коэффициент поверхности горения;
 $K_{\text{п}}$ — коэффициент пыления;
 m_j — йодное число (масса йода, которую присоединят 100 г масла);
 $\lambda_{\text{тв}}$ — коэффициент теплопроводности материала, на поверхность которого разливается СУГ, $\text{Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$;
 $\lambda_{\text{в}}$ — коэффициент теплопроводности воздуха, $\text{Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$.

Параметры взрыва

- I — импульс ударной волны, $\text{Па} \cdot \text{с}$;
 G — масса взрывчатого (горючего) вещества, кг;
 R — расстояние действия ударной волны, м;
 φ — угол отражения волны, град.;
 $t_{\text{сж}}$ — время действия фазы сжатия, с;
 r_0 — радиус заряда; м;
 E — энергия взрыва; кДж;
 d_s — эффективный диаметр огненного шара, м;
 τ_s — время существования огненного шара, с;
 r_s — радиус огненного шара, м;
 $R_{\text{пр}}$ — расстояние от центра взрыва до приемника ударной волны, м.

Принятые обозначения

- НКПР — нижний концентрационный предел распространения пламени;
НКПВ — нижний концентрационный предел воспламенения;
ВКПВ — верхний концентрационный предел воспламенения;
СУГ — сжиженные углеводороды;
ЛВЖ — легковоспламеняющиеся жидкости;
ГЖ — горючие жидкости;
НТПВ — нижний температурный предел воспламенения;
ВТПВ — верхний температурный предел воспламенения;
 W — влага топлива;
 A — зола.

Список используемой литературы

1. *Абдурагимов И.М.* Процессы горения /И.М. Абдурагимов, А.С. Андронов, Л.К. Исаева [и др.]. М.: Изд. ВИПТШ МВД СССР, 1984.
2. *Алексеев М.В.* Пожарная профилактика технологических процессов производств / М.В. Алексеев, О.М. Волков, Н.Ф. Шатров [и др.]. М.: ВИПТШ МВД СССР, 1986.
3. *Баратов А.Н.* Горение — Пожар — Взрыв — Безопасность. М.: ВНИИПО, 2003.
4. *Баратов А.Н.* Пожарная безопасность / А.Н. Баратов, В.А. Пчелинцев. М.: ВНИИПО, 1997.
5. *Бейкер У.* Взрывные явления. Оценка и последствия: в 2 кн. / под ред. Я.Б. Зельдовича, Б.Е. Гельфанда / У. Бейкер, П. Кокс, П. Уэстайн [и др.]. М.: Мир, 1986.
6. *Горшков В.И.* Самовозгорание веществ и материалов. М.: ВНИИПО. 2003.
7. *Демидов П.Г.* Горение и свойства горючих веществ: учеб. пособие для пожарно-технических училищ / П.Г. Демидов, В.А. Шандыба, П.П. Щеглов. М.: Химия. 1981.
8. *Дроздова Т.И.* Теория горения и взрыва. Процесс горения. Иркутск: ИрГТУ, 2008.
9. *Дроздова Т.И., Скушникова А.И.* Теория горения и взрыва. Процессы горения и взрыва: учеб. пособие. Иркутск: ИрГТУ, 2010.
10. *Корнилов А.В.* Задачник по курсу «Пожарная безопасность технологических процессов». Иркутск: ВСИ МВД РФ, 2003.
11. *Орлов Г.Г.* Охрана труда. М.: Стройиздат. 1984.
12. Пожаровзрывобезопасность веществ и материалов и средства их тушения: справочное изд.: в 2 кн.: кн. 1 / под ред. А.Н. Баратова, А.Я. Корольченко. М.: Химия, 1990.
13. *Таубкин С.И.* Пожар и взрыв, особенности их экспертизы. М.: ВНИИПО, 1999.
14. *Таубкин И.С.* Взрывы и их классификация // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. 2005. № 3. С. 81—98.
15. *Таубкин И.С.* Взрывы и их классификация // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. 2005. № 4. С. 95—119.

16. Тимофеева С.С., Дроздова Т.И. Теория горения и взрыва. Практикум. Ч. 1. Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2005.
17. Тимофеева С.С. Теория горения и взрыва / С.С. Тимофеева, Т.И. Дроздова, А.В. Корнилов. Практикум. Ч. 2. Иркутск: ИрГТУ, 2007.
18. Хзмалян Д.М. Теория топочных процессов: учеб. пособие для студентов вузов. М.: Энергоиздат, 1990.
19. Краткий справочник по химии / под ред. И.П. Гороновского, Ю.П. Назаренко, Е.Ф. Некряч. Киев: Наукова думка, 1974.

Нормативные документы

1. Федеральный Закон РФ от 22.07.08 г. № 123-ФЗ «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности».
2. Федеральный Закон РФ от 21.12.94 г. № 69-ФЗ «О пожарной безопасности».
3. ГОСТ 12.1.033—81 ССБТ. Пожарная безопасность. Термины и определения.
4. ГОСТ 12.1.044—89. Пожаровзрывобезопасность веществ и материалов. Номенклатура показателей и методы их определения.
5. ГОСТ Р 51330.5—99 (МЭК 60079-4—75). «Метод определения температуры самовоспламенения».
6. ГОСТ 12.1.010—76 (ст. СЭВ 3517—81). Взрывобезопасность. Общие требования. 1981.
7. ГОСТ РЕН 414—2002. Безопасность оборудования. Правила разработки и оформления стандартов по безопасности.
8. ГОСТ 27924—88 (МЭК 695-2-3—84). Испытания на пожароопасность. Методы испытаний.
9. СП 12.13130.2009. Определение категорий помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности. М.: МЧС России, 2009.

Переводная (в систему СИ) таблица некоторых единиц измерений

Международная система единиц, сокращенное обозначение — СИ, введена с 1 января 1963 г. для применения ее во всех областях науки и техники.

Система единиц СИ состоит из семи *основных единиц* (*метра* — для длины, *килограмма* — для массы, *секунды* — для времени, *кельвина* — для термодинамической температуры, *ампера* — для силы тока, *канделы* — для силы света и *моля* — для количества вещества); двух дополнительных единиц (*радиана* — для плоского угла, *стерадиана* — для телесного угла) и 85 важнейших производных единиц. Производные единицы, не включенные в стандарт, могут быть установлены по правилам образования производных единиц.

Важнейшими достоинствами Международной системы (СИ) являются:

- универсальность — охват всех областей измерительной техники;
- унификация единиц для всех видов измерения с выбором удобных для практики основных, дополнительных и производных единиц;
- когерентность (связность) системы, обусловленная тем, что в физических уравнениях, определяющих единицы измерения производных величин, коэффициент пропорциональности — безразмерная величина, равная единице;
- четкое разграничение единиц массы (килограмм) и силы (ньютон);
- устранение множественности систем и единиц измерения, а также переводных коэффициентов в расчетных формулах;
- упрощение записи физических и физико-химических уравнений;
- устранение существующего разнобоя и путаницы при использовании большого числа единиц и систем единиц измерения в педагогической практике;
- лучшее взаимопонимание при дальнейшем развитии научно-технических и торговых связей между различными странами.

Соотношение между единицами измерения

Объем

В качестве единицы объема принимается кубический метр — объем куба с длиной ребра, равной одному метру.

Дольными единицами объема являются кубический сантиметр, кубический дециметр, кубический миллиметр.

Таблица 1. Соотношение между единицами объема

Единица	м ³	дм ³	см ³	мм ³
1 куб. метр (м ³)	1	1000	10 ⁶	10 ⁹
1 куб. дециметр (дм ³)	0,001	1	1000	10 ⁶
1 куб. сантиметр (см ³)	10 ⁻⁶	0,001	1	1000
1 куб. миллиметр (мм ³)	10 ⁻⁹	10 ⁻⁶	0,001	1

Для измерения объема (вместимости, емкости) жидкостей и сыпучих веществ используется внесистемная единица — литр.

Литр равен объему 1 кг воды при температуре ее максимальной плотности (3,98 °С) и нормальном атмосферном давлении 1 литр = 1,000028 дм³; 1 дм³ = 0,999972. На практике применяют метрические кратные доли литра: килолитр, гектолитр, декалитр, миллилитр и т. д.

Масса

Под массой тела понимается мера его инертности, свойство сохранять приобретенное движение, проявляемое при приложении к телу силы.

Масса тела увеличивается с увеличением его скорости относительно той системы, в которой производится измерение. Если скорость тела невелика по сравнению со скоростью света, под массой понимается инертная масса, т. е. масса в состоянии покоя. Ее и принимают в качестве меры количества вещества, содержащегося в теле. Основной единицей количества вещества является килограмм.

В качестве единицы количества вещества применяют, кроме того, грамм, дольные и кратные единицы его, а также внесистемные — тонну, центнер, карат, грамм-моль, грамм-эквивалент и грамм-атом.

$$1 \text{ карат} = 0,2 \text{ г} = 2 \cdot 10^{-4} \text{ кг};$$

1 техническая единица массы (кг · с²/м) = 9,80665 кг. Мало распространенное название этой единицы — *инерта*.

Таблица 2. Соотношение между единицами массы (весового количества вещества)

Единицы	т	ц	кг	даг	г	дг	сг	мг	мкг
1 тонна (т)	1	10	1000	10 ⁵	10 ⁶	10 ⁷	10 ⁸	10 ⁹	10 ¹²
1 центнер (ц)	0,1	1	100	10 ⁴	10 ⁵	10 ⁶	10 ⁷	10 ⁸	10 ¹¹
1 килограмм (кг)	0,001	0,01	1	100	1000	10 ⁴	10 ⁵	10 ⁶	10 ⁹
1 декаграмм (даг)	10 ⁻⁵	10 ⁻⁴	0,01	1	10	100	1000	10 ⁴	10 ⁷
1 грамм (г)	10 ⁻⁶	10 ⁻⁵	0,001	0,1	1	10	100	1000	10 ⁶
1 дециграмм (дг)	10 ⁻⁷	10 ⁻⁶	10 ⁻⁴	0,01	0,1	1	10	100	10 ⁵
1 сантиграмм (сг)	10 ⁻⁸	10 ⁻⁷	10 ⁻⁵	0,001	0,01	0,1	1	10	10 ⁴
1 миллиграмм (мг)	10 ⁻⁹	10 ⁻⁸	10 ⁻⁶	10 ⁻⁴	0,001	0,01	0,1	1	10 ³
1 микрограмм (мкг)	10 ⁻¹²	10 ⁻¹¹	10 ⁻⁹	10 ⁻⁷	10 ⁻⁶	10 ⁻⁵	10 ⁻⁴	0,001	1

Количество вещества

В соответствии с рекомендациями международных организаций включена седьмая основная единица СИ — моль — единица количества вещества.

Моль — количество вещества системы, содержащей столько же структурных элементов, сколько содержится атомов в нуклиде ¹²C с массой 0,012 кг. При применении моля структурные элементы должны быть специфицированы и могут быть атомами, молекулами, ионами, электронами и другими частицами или специфицированными группами частиц.

Производные единицы молярных величин могут быть образованы заменой массы — килограмма единицей количества вещества — молем.

Таблица 3

Величина	Единица		
	наименование	обозначение	
		русское	международное
Количество вещества	Моль	моль	mol
Мольная масса	Киломоль	кмоль	kmol
Мольный объем	Килограмм на моль	кг/моль	kg/mol
Мольная внутренняя энергия, теплота, мольный, термодинамический потенциал	Кубический метр на моль	м ³ /моль	m ³ /mol
	Джоуль на моль	Дж/моль	J/mol

Давление

Давлением называется величина отношения нормальной составляющей силы к площади, на которую она действует. В качестве едини-

цы давления (механического напряжения) принимается *паскаль* — *давление в один ньютон на один квадратный метр (Па)*. В связи с тем, что эта единица очень мала, можно применять укрупненные единицы давления: *килопаскаль (кПа)*, *мегапаскаль (МПа)*. Единицами измерения давления (внесистемными) являются килограмм-сила на квадратный метр, сантиметр, миллиметр ($\text{кгс}/\text{м}^2$, $\text{кгс}/\text{см}^2$, $\text{кгс}/\text{мм}^2$). Давление также измеряют высотой столба жидкости: миллиметры ртутного столба — мм рт. ст.;

1 атм (техническая) = 0,1 МПа;

1 атм = 1,0133 бар = 101,3 кПа;

1 $\text{кгс}/\text{см}^2$ = 98,067 кПа;

1 $\text{кгс}/\text{мм}^2$ = 9806,65 кПа;

1 мм рт. ст. = 133,32 Па;

1 фунт/кв. дюйм = 0,069 бар = 6,9 кПа.

Тепловые величины

В единицах количества теплоты измеряются:

- внутренняя энергия системы — полный запас энергии тела, изменяющийся в процессе теплообмена и выполнения работы;
- энтальпия (теплосодержание) системы — сумма внутренней энергии и потенциальной функции.

Количество теплоты

Единицей количества тепла в системе СИ является *джоуль*.

В практике получила распространение международная килокалория, равная $1/859,845$ *абсолютного киловатт-часа*. Применяются также калория, ватт-час, киловатт-час и другие единицы энергии и работы.

1 кал = $1 \cdot 10^{-3}$ ккал = 4,1868 Дж;

1 Дж = 1 Вт · с = 0,238846 кал;

1 кВт · ч = $3600 \cdot 10^3$ Дж = 859,845 ккал.

Ранее принималось, что 1 кал соответствует количеству теплоты, необходимому для нагревания 1 кг воды на 1 °С при нормальном давлении. В связи с тем, что теплоемкость воды зависит от температуры, возникли следующие единицы:

- кал_{15} — количество теплоты, сообщаемое 1 г воды при нагреве ее от 14,5 до 15,5 °С; $1 \text{ кал}_{15} = 4,1841$ Дж;
- кал_{20} — количество теплоты, сообщаемое 1 г воды при нагреве ее от 19,5 до 20,5 °С; $1 \text{ кал}_{20} = 4,182$ Дж;

- кал_{среди} — 1/100 часть количества теплоты, сообщаемая 1 г воды при нагреве ее от 0 до 100 °С; 1 кал_{среди} = 4,1868 Дж;
- кал_{межд} = 4,18605 Дж;
- калория термохимическая = 4,1840 Дж;
- калория Национального Бюро стандартов США = 4,18409 Дж.

Удельная теплота и тепловой поток

Удельная теплота (удельная энтальпия, внутренняя энергия, теплота фазового превращения, химической реакции и др.) — количество тепла, отнесенное к единице массы вещества.

Единицей удельной теплоты в системе СИ является Дж/кг и Дж/кмоль. В практике распространены ккал/кг, кал/г, эрг/г, а также ккал/моль, кал/моль:

- 1 ккал/кг = 4186,8 Дж/кг = 4,1868 кДж/кг;
- 1 кал/г;
- 1 эрг/г = 10^{-4} Дж/кг;
- 1 Дж/кмоль = 10^{-3} Дж/моль = $0,238846 \cdot 10^{-3}$ ккал/кмоль = $0,238846 \cdot 10^{-3}$ кал/моль.

Тепловой поток и тепловая мощность. Единицей для измерения теплового потока и тепловой мощности в системе СИ является ватт:

- 1 Вт = 0,238846 кал/с = 0,859845 ккал/ч;
- 1 ккал/ч = 0,27778 кал/с = 1,1630 Вт;
- 1 кал/с = 3,6 ккал/ч = 4,1868 Вт.

Удельный тепловой поток — плотность теплового потока, или поверхностная плотность излучения, измеряется в Вт/м²:

- 1 Вт/м² = $0,238846 \cdot 10^{-4}$ кал/(см² · с) = 0,859845 ккал/(м² · ч);
- 1 ккал/(м² · ч) = $0,27778 \cdot 10^{-4}$ кал/(см² · с) = 1,1630 Вт/м²;
- 1 кал/(см² · с) = $3,6 \cdot 10^4$ ккал/(м² · ч) = $4,1868 \cdot 10^4$ Вт/м².

Теплоемкость и энтропия

Теплоемкость тела (системы) — это количество тепла, сообщаемого телу для изменения его температуры на 1 °С; выражается она в джоулях на кельвин (Дж/К) и калориях на кельвин (кал/К).

Энтропия тела (системы) определяется как отношение количества тепла, полученного или отданного телом, к его абсолютной температуре. Единицами измерения являются джоуль на кельвин, килокалория на кельвин (ккал/К) и т. д.

Удельная теплоемкость и удельная энтропия — это теплоемкость и энтропия, отнесенные к единице массы.

Различают:

- *весовую (массовую) теплоемкость* — количество теплоты, сообщаемой единице массы вещества (1 кг, 1 г и т. д.), для изменения его температуры на 1 °С. Размерности ее следующие: Дж/(кг · К); кДж/(кг · К); ккал/(кг · К); кал/(г · К);
- *мольную теплоемкость* — количество теплоты, сообщаемой 1 молю или 1 киломолю вещества для изменения его температуры на 1 °С. Ее размерности: Дж/(кмоль · К); ккал/(кмоль · К); кал/(моль · К);
- *объемную теплоемкость* — количество теплоты, сообщаемой 1 м³ вещества для изменения его температуры на 1 °С. Ее размерности: Дж/(м³ · К); ккал/(м³ · К).

В зависимости от процесса, в котором сообщается теплота, различают для газов и паров удельную теплоемкость при постоянном давлении и теплоемкость при постоянном объеме. Для жидкостей это различие незначительное, поэтому не приводится.

Размерности удельной энтропии: Дж/(кг · К); эрг/(г · К).

Таблица 4. Соотношение между единицами массовой (весовой) теплоемкости

Единица	ккал/(кг · К)	кал/(г · К)	Дж/(кг · К)	кДж/(кг · К)	эрг/(г · К)
1 ккал/(кг · К)	1	1	4187	4,187	$41,87 \cdot 10^6$
1 кал/(г · К)	1	1	4187	4,187	$41,87 \cdot 10^6$
1 Дж/(кг · К)	$0,239 \cdot 10^{-3}$	$0,239 \cdot 10^{-3}$	1	0,001	10^4
1 кДж/(кг · К)	0,239	0,239	1000	1	10^7
1 эрг/(г · К)	$23,9 \cdot 10^{-9}$	$23,9 \cdot 10^{-9}$	10^{-4}	10^{-7}	1

$1 \text{ ккал}/(\text{кг} \cdot \text{К}) = 4186,8 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К}) = 4,1868 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К}) = 41,868 \times 10^6 \text{ эрг}/(\text{г} \cdot \text{К})$.

Таблица 5. Соотношение между единицами удельной энтропии

Единица	ккал/(кг · К)	кал/(г · К)	Дж/(кг · К)	эрг/(г · К)	кГ · м/(кг · К)
1 ккал/(кг · К)	1	1	4187	$41,87 \cdot 10^6$	427
1 кал/(г · К)	1	1	4187	$41,87 \cdot 10^6$	427
1 Дж/(кг · К)	$239 \cdot 10^{-6}$	$239 \cdot 10^{-6}$	1	10^4	0,102
1 эрг/(г · К)	$23,9 \cdot 10^{-9}$	$23,9 \cdot 10^{-9}$	10^{-4}	1	$10,2 \cdot 10^{-6}$
1 кГ · м/(кг · К)	$2,342 \cdot 10^{-3}$	$2,342 \cdot 10^{-3}$	9,81	$98,1 \cdot 10^3$	1

- $1 \text{ кал}/(\text{г} \cdot \text{К}) = 4,1868 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К}) = 4186,8 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К}) = 4,1868 \times 10^7 \text{ эрг}/(\text{г} \cdot \text{К}) = 426,935 \text{ кГ} \cdot \text{м}/(\text{кг} \cdot \text{К})$;

- $1 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К}) = 10^{-3} \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К}) = 0,101972 \text{ кг} \cdot \text{м}/(\text{кг} \cdot \text{К}) = 0,238846 \cdot 10^{-3} \text{ ккал}/(\text{кг} \cdot \text{К});$
- $1 \text{ кг} \cdot \text{м}/(\text{кг} \cdot \text{К}) = 2,34228 \cdot 10^{-3} \text{ ккал}/(\text{кг} \cdot \text{К}) = 9,80665 \text{ Дж}/(\text{кг} \times \text{К}) = 9,80665 \cdot 10^4 \text{ эрг}/(\text{г} \cdot \text{К});$
- $1 \text{ кал}/(\text{моль} \cdot \text{К}) = 1 \text{ ккал}/(\text{кмоль} \cdot \text{К}) = 4,1868 \text{ Дж}/(\text{моль} \cdot \text{К}) = 4186,8 \text{ Дж}/(\text{кмоль} \cdot \text{К}).$

Коэффициенты теплоотдачи и теплопередачи

Коэффициенты теплоотдачи и теплопередачи имеют размерность в системе СИ $\text{Вт}/\text{м}^2 \cdot \text{К}$.

Применяют единицы:

- $1 \text{ ккал}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{К}) = 0,27778 \cdot 10^{-4} \text{ кал}/(\text{см}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{К}) = 1,1630 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К});$
- $1 \text{ кал}/(\text{см}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{К}) = 3,6 \cdot 10^4 \text{ ккал}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{К}) = 41868 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К});$
- $1 \text{ эрг}/(\text{см}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{К}) = 10^{-3} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К});$
- $1 \text{ Вт}/(\text{см}^2 \cdot \text{К}) = 10^4 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К});$
- $1 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}) = 0,238846 \cdot 10^{-4} \text{ кал}/(\text{см}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{К}) = 0,859845 \text{ ккал}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{К}) = 10^3 \text{ эрг}/(\text{см}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{К}) = 10^{-4} \text{ Вт}/(\text{см}^2 \cdot \text{К}).$

Коэффициенты теплопроводности имеют размерность в системе СИ $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$. В практике применяют:

- $1 \text{ ккал}/(\text{м} \cdot \text{ч} \cdot \text{К}) = 0,27778 \cdot 10^{-2} \text{ кал}/(\text{см} \cdot \text{с} \cdot \text{К}) = 1,1630 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К});$
- $1 \text{ кал}/(\text{см} \cdot \text{с} \cdot \text{К}) = 3,6 \cdot 10^2 \text{ ккал}/(\text{м} \cdot \text{ч} \cdot \text{К}) = 418,68 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К});$
- $1 \text{ Вт}/(\text{см} \cdot \text{К}) = 100 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К});$
- $1 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К}) = 0,238846 \cdot 10^{-2} \text{ кал}/(\text{см} \cdot \text{с} \cdot \text{К}) = 0,85984 \text{ Ккал}/(\text{м} \cdot \text{ч} \cdot \text{К}).$

Коэффициенты температуропроводности имеют размерность в системе СИ $\text{м}^2/\text{с}$.

Коэффициенты лучеиспускания (в формуле Стефана — Больцмана) имеют размерность в системе СИ $5,67 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4) = 1,36 \cdot 10^{-4} \text{ кал}/(\text{см}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{К}^4) = 4,88 \text{ ккал}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{К}^4).$

Коэффициенты диффузии имеют размерность в системе СИ $\text{м}^2/\text{с}$.

Температура

Международными метрологическими организациями рекомендованы четыре температурные шкалы:

- *абсолютная термодинамическая шкала (Кельвина)* с нижней границей — точкой абсолютного нуля (0 К) и реперной точкой — тройной точкой воды, в которой находятся в термодинамическом равновесии три фазы воды — твердая, жидкая, газообразная (273,16 К);
- *стоградусная термодинамическая шкала* — с началом отсчета в точке, лежащей на 0,01° ниже тройной точки воды (температура плавления льда при давлении 101325 Па);
- *стоградусная международная шкала*, основанная на использовании определенного количества реперных точек — кипения кислорода, плавления льда, кипения воды и серы, затвердевания серебра и золота. Температура этой практической шкалы выражается в градусах стоградусной шкалы (°С);
- *абсолютная международная шкала* — аналогична предыдущей, с отсчетом от абсолютного нуля.

В иностранной литературе встречаются также измерения температуры в градусах **Фаренгейта (F)** и **Ренкина (Ra)**. В старой литературе имеется обозначение температуры в градусах **Реомюра (R)**.

Перевод градусов одной шкалы в градусы другой производят по следующим формулам:

$$t = T - 273,15 = 5/9(f - 32) = 5/9F - 273,15 = 5/4 \cdot r;$$

$$T = t + 273,15 = 5/9 \cdot f + 255,37 = 5/9 \cdot r + 273,15;$$

$$F = 9/5 \cdot t + 491,67 = 9/5 \cdot T = f + 459,67 = 9/4 \cdot r + 491,67;$$

$$f = 9/5t + 32 = 9/5 \cdot T - 459,67 = F - 459,67 = 9/4 \cdot r + 32;$$

$$r = 4/5t = 4/5(T - 273,15) = 4/9(f - 32) = 4/9 \cdot F - 218,52,$$

где t (Цельсия), T (Кельвина), f (Фаренгейта), F (Ренкина), r (Реомюра) — температура, измеряемая в °С, К, F, °Ra, °R, соответственно.

Образование кратных и дольных единиц

Кратные и дольные единицы измерения образуются путем умножения и деления основных и производных единиц (приведены в табл. 6).

Таблица 6

Кратность и дольность	Наименование приставки	Сокращенное обозначение	
		русское	международное
$1\ 000\ 000\ 000\ 000 = 10^{12}$	тера	Т	T
$1\ 000\ 000\ 000 = 10^9$	гига	Г	G
$1\ 000\ 000 = 10^6$	мега	М	M
$1000 = 10^3$	кило	к	k
$100 = 10^2$	гекто	г	h
$10 = 10^1$	дека	да	da
$0,1 = 10^{-1}$	деци	д	d
$0,01 = 10^{-2}$	санти	с	c
$0,001 = 10^{-3}$	милли	м	m
$0,000001 = 10^{-6}$	микро	мк	μ
$0,000000001 = 10^{-9}$	нано	н	n
$0,000000000001 = 10^{-12}$	пико	п	p
$0,000000000000001 = 10^{-15}$	фемто	ф	f
$0,000000000000000001 = 10^{-18}$	атто	а	a

Таблица 7. Основные единицы измерения

Величина	Обозначение	Размерность	Наименование
Длина	l	м	Метр
Масса	m	кг	Килограмм
Время	τ	с	Секунда
Температура	T, t	К, °С	Кельвин, градус Цельсия
Плотность	ρ	кг/м ³	Килограмм на кубический метр
Удельный вес	γ	н/м ³	Ньютон на кубический метр
Давление	P	Па	Паскаль
Объемный расход. Динамический коэффициент вязкости	V	м ³ /с; Па·с	Кубический метр в секунду; Паскаль-секунда
Динамический коэффициент вязкости	η	Па·с	Паскаль-секунда

Окончание табл. 7

Величина	Обозначение	Размерность	Наименование
Кинематический коэффициент вязкости	ν	$\text{м}^2/\text{с}$	Квадратный метр в секунду
Коэффициент диффузии	D	$\text{м}^2/\text{с}$	Квадратный метр в секунду
Количество тепла	Q	Дж	Джоуль
Тепловой поток	Q	Вт	Ватт
Плотность теплового потока	q	$\text{Вт}/\text{м}^2$	Ватт на квадратный метр
Энергия активации	E	Дж/моль	Джоуль на моль
Массовая скорость выгорания	ρ, v	$(\text{кг}/\text{м}^2 \cdot \text{с})$	Килограмм на квадратный метр-секунду
Линейная скорость выгорания	v	$\text{м}/\text{с}$	Метр в секунду
Удельная теплоемкость	c	Дж/(кг · К)	Джоуль на килограмм-кельвин
Коэффициент теплопроводности	λ	$\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$	Ватт на метр-кельвин
Коэффициент температуропроводности	a	$\text{м}^2/\text{с}$	Квадратный метр на секунду
Коэффициент теплопередачи	α	$\text{Вт}/(\text{м}^2/\text{с})$	Ватт на квадратный метр-градус

Таблица 8. Английская система мер

Раздробление	Английское название	Перевод в метрические меры
Меры длины		
1 англ. миля = 1760 ярдам	statute mile (stat.mi)	1,609 км = 1609,344 м
1 ярд = 3 фута	yard (yd)	0,9144 м
1 фут = 12 дюймам*	foot (ft)	0,3048 м
1 дюйм*	inch (in)	2,54 см = 0,0254 м
1 фарлонг = 10 чейнам	furlong	201,168 м
1 чейн = 4 родам	chain	20,1168 м
1 род	rod	5,0292 м
1 англ. морск. миля = 6080 футам	nautical mile (n. mile)	1,852 км = 1852 м
1 кабельтов	185,2 м

Раздробление	Английское название	Перевод в метрические меры
Меры поверхности		
1 кв. англ. миля = 640 акрам 1 акр = 4 рудам = 4840 кв. ярдам 1 руд = 1210 кв. ярдам 1 кв. ярд = 9 кв. футам 1 кв. фут = 144 кв. дюймам* 1 кв. дюйм*	square mile (sq. mi) acre (ac) rood square yard (sq. yd) square foot (sq. ft) square inch (sq. in)	2,59 км ² 0,405 га = 4046,86 м ² 1011,71 м ² 0,836127 м ² 9,2903 дм ² 6,4516 см ²
Меры объема		
1 регистр. тонна = 100 куб. футам 1 куб. ярд = 27 куб. футам 1 куб. фут = 1728 куб. дюймам* 1 куб. дюйм*	register ton cubic yard (cu. yd) cubic foot (cu. ft) cubic inch (cu. in)	2,83 м ³ 0,764 м ³ 28,3168 м ³ 16,3871 м ³
Меры емкости (для жидкостей)		
1 кварталер = 64 галлонам 1 галлон = 4 квартам** 1 кварта = 2 пинтам 1 пинта	qarter imperial gallon qart pint	290,95 дм ³ 4,546 дм ³ 1,137 дм ³ 0,568 дм ³
Меры емкости (для сыпучих тел)		
1 кварталер = 8 бушелям 1 бушель = 8 галлонам	qarter bushel	290,95 дм ³ 36,369 дм ³
Меры веса (массы)		
1 англ. тонна = 20 центнерам 1 центнер = 112 фунтам 1 фунт = 16 торг. унциям = = 7000 англ. грамам 1 торг. унция = 16 драхмам*** 1 драхма*** 1 англ. гран	ton, long ton hundredweight (cwt) pound ounce (oz) drachm grain	1,016 т = 1016,05 кг 50,8024 кг 0,4536 кг 28,3495 г 1,77 г 64,79891 мг

* Английские футы и дюймы тождественны с русскими.

** 1 галлон = 277,274 куб. дюйма.

*** Аптекарские унции и драхмы больше английских торговых, а именно:

1 апт. унция = 8 апт. драхмам = 31,1035 г;

1 апт. драхма = 3 скрупулам = 3,888 г;

1 скрупул = 20 грамам = 1,29598 г.

Таблица 9. Производные единицы английской системы мер

Единица	Сокращенное английское обозначение	Перевод в метрические меры
Линейная скорость	1 in/s	$25,4 \cdot 10^{-3}$ м/с
	1 ft/s	0,3048 м/с
	1 yd/s	0,9144 м/с
	1 kn (узел)	0,5144 м/с
Линейное ускорение	1 ft/s ²	0,3048 м/с ²
	1 yd/s ²	0,9144 м/с ²
Плотность	1 lb/ft ³	16,0185 кг/м ³
	1 lb/in ³	27680 кг/м ³
	1 oz/ft ³	1,00116 кг/м ³
Мольный объем	1 ft ³ /lb	0,062428 м ³ /кг
	1 ft ³ /oz	0,99885 м ³ /кг
	in ³ /lb	$36,1272 \cdot 10^{-6}$ м ³ /кг
Массовый расход	1 tn/h	0,282 кг/с
	1 lb/s	0,454 кг/с
	1 lb/h	$126 \cdot 10^{-6}$ кг/с
	1 oz/s	$28,3 \cdot 10^{-3}$ кг/с
Объемный расход	1 yd ³ /s	0,765 м ³ /с
	1 ft ³ /s	$28,3 \cdot 10^{-3}$ м ³ /с
	1 in ³ /s	$16,4 \cdot 10^{-6}$ м ³ /с
Сила	1 bf (фунт-сила)	4,44822 Н
	1 nf (тонна-сила)	9964,02 Н
	pdl (паундаль)	0,138255 Н
Динамическая вязкость	1 lbf · s/ft ²	47,88 Па · с
Кинетическая вязкость	1 yd ² /s	0,836 м ² /с
	1 ft ² /s	0,0929 м ² /с
	1 ft ² /h	25,81 м ² /с
Давление	1 lbf/in ²	6394,76 Па
	1 lbf/ft ²	47,88 Па
	1 tnf/in ²	15,4443 МПа
	1 in H ₂ O	249,2 Па
	1 in Hg	3386 Па
Работа и энергия	1 lbf · ft	1,35582 Дж
	1 lbf · in	0,113 Дж
	1 British thermal unit — 1 Btu (британская единица тепла)	1055,06 Дж
	1 Pound centigrad unit — 1 Chu (Pcu) — стоградусная единица тепла	1899,1 Дж

Единица	Сокращенное английское обозначение	Перевод в метрические меры
Мощность	1 lbf — ft/s 1 Btu/s 1 Chu/s	1,356 Вт 1055,06 Вт 1899 Вт
Тепловая мощность и тепловой поток	1 Btu/s 1 Btu/h	0,293 Вт 1055,06 Вт
Удельная теплота	1 Btu/lb 1 Chu /lb	2326 Дж/кг 4186,8 Дж/кг = 4,1868 кДж/кг
Удельная массовая теплоемкость	1 Btu/(lb · deg F) 1 Chu/(lb · deg F)	4186,8 Дж/(кг · К) = = 4,1868 кДж/(кг · К)
Удельная объемная теплоемкость	1 Btu/(ft ³ · deg F)	67 · 10 ³ Дж/(м ³ · К) = = 67 кДж/(м ³ · К)
Удельная энтропия	1 Btu/(lb · °R) 1 Btu/(lb · mole · °R)	4186,8 Дж/(кг · К) = = 4,1868 кДж/(кг · К) 4,1868 кДж/(кмоль · К) = = 4186,8 Дж/(кмоль · К)
Коэффициент теплоотдачи и теплопередачи	1 Btu/(ft ² · h · deg F)	5,68 Вт/(м ² · К)
Коэффициент теплопроводности	1 Btu/(ft · h · deg F) 1 Btu/(ft · h · deg F)	1,73 Вт/(м · К) 20,8 Вт/(м · К)

В США принята английская система, но есть некоторые особенности и дополнения, которые приведены в табл. 10.

Таблица 10. Американская система мер

Раздробление	Английское название	Перевод в метрическую систему
1 амер. миля = 3 морским милям	statute mile (mi)	4,827 км
1 тауншип = 36 кв. милям	township	93,236 км ²
1 бушель	bushel (bu)	35,2393 дм ³
1 (винный) галлон = 0,833 англ. галлона	gallon	3,78543 дм ³
1 сухой галлон	gallon	4,4047 дм ³
1 баррель нефтяной = 42 галлонам	barrel	158,998 дм ³
1 баррель керосина = 40 галлонам	barrel	151,404 дм ³
1 баррель пива = 31 галлону	barrel	117,303 дм ³
1 баррель сухой	bbbl	115,628 дм ³
1 малая (судовая) тонна = 2000 англ. фунтам	shot ton	0,907 т = 907,183 кг
1 жидкая унция	fl. oz	29,5737 см ³

Основные и производные тепловые единицы

Таблица 11. Тепловые единицы измерения

Наименование величины	Определяющее уравнение	Единица измерения	Сокращенное обозначение единицы		Размер единицы	Размерность
			русское	международное		
<i>Основные единицы</i>						
Длина		метр	м	m		
Масса		килограмм	кг	kg		
Время		секунда	с	s		
Температура		кельвин	К	K		
<i>Производные единицы</i>						
Количество теплоты, термодинамический потенциал (внутренняя энергия, энтальпия, свободная энергия, свободная энтальпия); теплота фазового превращения, теплота химической реакции	$Q = W$	Джоуль	Дж	J	(1 Н) · (1 м)	$\text{м}^2 \cdot \text{кг} \cdot \text{с}^{-2}$

Наименование величины	Определяющее уравнение	Единица измерения	Сокращенное обозначение единицы		Размер единицы	Размерность
			русское	международное		
Удельная теплота (химической реакции, фазового превращения), удельная внутренняя энергия, удельная энтальпия. Удельный термодинамический потенциал	$r = Q/m$ $\lambda = Q/m$ $q = Q/m$	Джоуль на килограмм	Дж/кг	J/kg	(1 Дж) : (1 кг)	$\text{м}^2 \cdot \text{с}^{-2}$
Коэффициент линейного расширения	$\alpha = \Delta l/l_0 \cdot \Delta T$	Кельвин в минус первой степени	К^{-1}	К^{-1}	(1):(1 К)	К^{-1}
Коэффициент объемного расширения	$\beta = \Delta V/V_0 \cdot \Delta T$	Кельвин в минус первой степени	К^{-1}	К^{-1}	(1):(1 К)	К^{-1}
Теплоемкость системы	$C = Q/\Delta T$	Джоуль на градус	Дж/К	J/К	(1 Дж):(1 К)	$\text{м}^{-2} \cdot \text{кг} \cdot \text{с}^{-2} \cdot \text{К}^{-1}$
Удельная теплоемкость (массовая)	$c = Q/m \cdot \Delta T$	Джоуль на килограмм-градус	Дж/(кг·К)	J/(kg·K)	(1 Дж):[(1 кг)·(1 К)]	$\text{м}^{-2} \cdot \text{кг} \cdot \text{с}^{-2} \cdot \text{К}^{-1}$
Удельная объемная теплоемкость	$c = Q/V \Delta T$	Джоуль на кубический метр · Кельвин	Дж/($\text{м}^3 \cdot \text{К}$)	J/($\text{м}^3 \cdot \text{К}$)	(1 Дж):[(1 м^3)·(1 К)]	$\text{м}^{-1} \cdot \text{кг} \cdot \text{с}^{-2} \cdot \text{К}^{-1}$

Наименование величины	Определяющее уравнение	Единица измерения	Сокращенное обозначение единицы		Размер единицы	Размерность
			русское	международное		
Мольная теплоемкость	$C = Mc$	Джоуль на кило-моль · кельвин	Дж/(кмоль·К)	J/(kmol·K)	(1 Дж):(1 К)	$\text{м}^2 \cdot \text{кг} \cdot \text{с}^{-2} \cdot \text{К}^{-1}$
Энтропия системы	$S = \Delta Q/T$	Джоуль на кельвин	Дж/К	J/K	(1 Дж):(1 К)	$\text{м}^2 \cdot \text{кг} \cdot \text{с}^{-2} \cdot \text{К}^{-1}$
Удельная энтропия	$s = S/m$	Джоуль на кило-грам · кельвин	Дж/(кг·К)	J/(kg·K)	(1 Дж):[(1 кг)·(1 К)]	$\text{м}^2 \cdot \text{с}^{-2} \cdot \text{К}^{-1}$
Тепловой поток	$\Phi = Q/t$	Ватт	Вт	W	(1 Дж):(1 с)	$\text{м}^2 \cdot \text{кг} \cdot \text{с}^{-3}$
Плотность теплового потока, поверхностная плотность излучения	$q = \Phi/S$	Ватт на квадратный метр	Вт/м ²	W/m ²	(1 Вт):(1 м ²)	$\text{кг} \cdot \text{с}^{-3}$
Тепловая мощность (котла, печи и т. п.)	$N = Q/t$	Ватт	Вт	W	(1 Дж):(1 с)	$\text{м}^2 \cdot \text{кг} \cdot \text{с}^{-3}$
Коэффициент теплоотдачи, теплопередачи, теплообмена	$\alpha = \Phi/S \cdot \Delta T$	Ватт на квадратный метр · кельвин	Вт/(м ² ·К)	W/(m ² ·K)	(1 Вт):[(1 м ²)·(1 К)]	$\text{м} \cdot \text{кг} \cdot \text{с}^{-3} \cdot \text{К}^{-1}$
Температурный градиент	$KT = \Delta T/\Delta l$	Кельвин на метр	К/м	K/m	(1 К):(1 м)	$\text{м}^{-1} \cdot \text{К}$

Наименование величины	Определяющее уравнение	Единица измерения	Сокращенное обозначение единицы		Размер единицы	Размерность
			русское	международное		
Температурный коэффициент		Кельвин в минус первой степени	K^{-1}	K^{-1}	K^{-1}	K^{-1}
Коэффициент теплопроводности	$\lambda = Q/tS \cdot (\Delta T/\Delta l)$	Ватт на метр-кельвин	Вт/(м·К)	W/(m·K)	(1 Вт):(1 м ²)·(1 К)	м·кг·с ⁻³ ·К ⁻¹
Коэффициент лучеиспускания		Джоуль на квадратный метр-кельвин в четвертой степени	Дж/(м ² ·К ⁴)	J/(m ² ·K ⁴)	(1 Дж):(1 м ²)·(1 К ⁴)	кг·с ⁻² ·К ⁴
Коэффициент температуропроводности		Квадратный метр на секунду	м ² /с	m ² /s	(1 м ²):(1 с)	м ² ·с ⁻¹
Коэффициент массопередачи		Килограмм на секунду. Кубический метр на секунду	кг/с	kg/s	(1 кг):(1 с)	кг·с ⁻¹
			м ³ /с	m ³ /s	(1 м ³):(1 с)	м ³ ·с ⁻¹
Коэффициент диффузии		Квадратный метр на секунду	м ² /с	m ² /s	(1 м ²):(1 с)	м ² ·с ⁻¹

Основные физические постоянные

Число Авогадро (по углеродной шкале) (N_A) — число структурных элементов (атомов, молекул, ионов и т. д.) в 1 моле.

$$N_A = 6,02252 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}.$$

Универсальная газовая постоянная $R = 8,314$ Дж/(моль · К) — численно равна работе расширения 1 моля идеального газа под постоянным давлением при нагревании на 1 К.

В системе СИ:

$$R = 8,31441 \text{ Дж}/(\text{моль} \cdot \text{К}); \text{ равна } 1,9872 \text{ кал}/(\text{моль} \cdot \text{К}) = \\ = 8,314 \cdot 10^7 \text{ эрг}/(\text{моль} \cdot \text{К}).$$

Нормальные условия:

$$T_0 = 0 \text{ }^\circ\text{C} (273 \text{ К}), p = 760 \text{ мм рт. ст.} (0,10 \text{ кПа}).$$

Физико-химические константы горючих веществ

Таблица 1. Показатели пожарной опасности некоторых твердых горючих материалов

Название	$T_{св}$, К	$T_{в}$, К	Q_H , кДж/кг	u_{max} , кг/(м ³ · мин)
Антрацит	773	—	31 425	—
Винипласт	723	623	18 105	—
Волокно ацетатное	708	628	—	—
Волокно вискозное	718	593	15 511,9	—
Волокно лавсан	713	663	22 584,1	—
Волокно капрон	713	663	30 754,6	—
Древесина сосновая ($W = 9\%$)	568	528	12 570—14 665	—
Картон гофрированный	704	531	—	—
Каучук натуральный	—	402	44 833	0,8
Линолеум релин	683	581	—	—
Пенопласт ПВХ	774	701	—	—
Парафин	503	431—468	—	—
ДВП (древесноволокнистая плита)	618	495	—	—
Пенополиуретан	753	713	24 352	0,88—0,92
Сено ($W = 7,8\%$)	(477)	477	—	—
Полистирол ПСБ-С	—	—	38 967	0,86
Полиэтилен низкого давления	694	583	47 137,5	0,62
Стекло органическое	733	533		0,86
Торф фрезерный	(498)	—	10 454	0,18 (в караванах)
Хлопок ($W = 4,5\%$)	(478)	483	15 712,5	0,24 (разрыл.)

Таблица 2. Показатели пожарной опасности некоторых газов

Название	Химическая формула	$T_{св}$, К	КПВ, об.	$u_{н}$, м/с	МВСК при разб. CO_2	$E_{мин}$, мДж	Огнетуш. конц., % об.		T_r , расч., К	Стехиометрическая смесь, % об.	
							CO_2	N_2		% газа	% воздуха
Аммиак	NH_3	903	15—28	1,35	16,2	680	57	70			
Ацетилен	C_2H_2	608	2—18	0,42	9				2307	7,7	92,3
Оксид углерода	CO	883	12,5—74,2	2,67	9,8		53	69	2000	28,5	70,5
Водород	H_2	783	4—74,2	0,37	7,9	0,017	62	76	2072	29,5	70,5
Метан	CH_4	810	5—15	0,40	15,6	0,28	26	39	1927	9,5	90,5
Этан	C_2H_6	745	3,22—12,45	0,38	13,8	0,24	34	46	1922	5,64	94,36
Пропан	C_3H_8	739	2,37—9,5	0,37	14,3	0,25	32	45	1987	4,02	95,98
Бутан	C_4H_{10}	678	1,86—8,41	0,385	14,9	90,25	29	41	2010	3,12	96,88
Гексан	C_6H_{14}	507	1,25—6,9	0,63	14,6	0,25	30	43	2007	2,16	97,84
Этилен	C_2H_4	813	3,75—29,6		12,1	0,12	42	52	2067	6,5	93,5
Сероводород	H_2S	519	4,3—45,5		8		62			12,24	87,76
Водяной газ		773—873	6—70								
Коксовый газ		913	5,6—30,8								
Природный газ		823—1023	5,1—12,1+25								
Доменный газ			65—73,9								

Обозначения. $T_{св}$ — температура самовоспламенения; КПВ — область воспламенения; $u_{н}$ — максимальное значение нормальной скорости горения; МВСК — минимальное взрывоопасное содержание кислорода при разбавлении газозвушной смеси углекислым газом; $E_{мин}$ — минимальная энергия зажигания; T_r — расчетная адиабатическая температура горения с учетом диссоциации продуктов сгорания.

Примечание. Состав газовых смесей: водяной газ CO — 37 %, CO_2 — 6,5 %, N_2 — 5,5 %, H_2 — 50 %, CH_4 — 0,5 %; коксовый газ CO — 6,0 %, CO_2 — 2,8 %, N_2 — 7,8 %, H_2 — 58 %, CH_4 — 22,5 %; природный газ CO — 3,3 %, CH_4 — 94 %, C_nH_m — 2,5 %; доменный газ CO — 28 %, CO_2 — 10,5 %, N_2 — 58,5 %, H_2 — 2,7 %, CH_4 — 0,3 %.

Таблица 3. Физико-химические константы некоторых горючих жидкостей

Название	Химическая формула	M	ρ , кг/м ³	d по возд.	$t_{пл}$, °C	$t_{кип}$, °C	$D_0 \cdot 10^{-4}$, м ² /с	ΔH_f^0 , кДж/моль
Ацетон	C ₃ H ₆ O	58,08	790,8	2,0	-95,35	56,2	0,086	248,1
Бензол	C ₆ H ₆	78,11	879	2,77	5,5	80,1	0,096	-34,8
Гексан	C ₆ H ₁₄	86,18	659,3	3	-95,3	68,7	—	211,2
Глицерин	C ₃ H ₈ O ₃	92,09	1260,4	3,2	17,9	290	0,08	675,4
Метанол	CH ₃ OH	32,04	795	1,1	-97,8	64,7	0,162	239,0
Этанол	C ₂ H ₅ OH	46,07	789,3	1,6	-114,6	78,37	0,132	278,2
Пропанол-1	C ₃ H ₇ OH	60,10	804,4	2,1	-127	98,8	0,080	307,1
Бутанол-1	C ₄ H ₉ OH	74,12	809,8	2,6	-79,9	117,5	0,0681	3411,5
трет-Бутиловый спирт	(CH ₃) ₃ COH	74,12	788,7	2,6	26,5	82,8	—	—
н-Амиловый спирт	C ₅ H ₁₁ OH	88,15	814,4	3,1	-78,5	138	0,089	359,1
Толуол	C ₆ H ₅ CH ₃	92,14	866,9	3,2	-95	110,6	0,084	4,19
Эфир диэтиловый	C ₄ H ₁₀ O	74,12	713,5	2,6	117,6	35,6	0,896	283,2
Этиленгликоль	C ₂ H ₆ O ₂	62,07	1114	2,15	-15,6	107,8	—	456,4
Бензин Б70		—	745	—	—	—	—	—
Керосин тракторный		—	823	—	—	—	—	—
Трансформаторное масло		—	877	—	—	—	—	—
Масло подсолнечное		91,0	913	—	—	—	—	—
Нефть карадагская		—	813	—	—	—	—	—
Скипидар		—	870	4,7	—	160	—	—

Обозначения: M — молекулярная масса; ρ — плотность при нормальных условиях; d — относительная масса (для воздуха 1,000); $t_{пл}$ и $t_{кип}$ — температура плавления и кипения при давлении 101 325 Па; D_0 — коэффициент диффузии в воздухе; ΔH_f^0 — теплота образования.

Таблица 4. Физические константы некоторых горючих газов

Газ	Формула	M	V_0 , дм ³	ρ , кг/м ³	$t_{пл}$, °C	$t_{кип}$, °C
Воздух		28,98	22,40	1,293	-231	-192
Оксид углерода	CO	28,011	22,40	1,25	-205	-192
Диоксид углерода	CO ₂	44,01	22,26	1,977	-56,6 (52 МПа)	возг. -78,6
Метан	CH ₄	16,043	22,36	0,717	-182,5	-161,5
Этан	C ₂ H ₆	30,07	22,16	1,357	-182,8	-88,6
Пропан	C ₃ H ₈	44,097	22,00	2,019	-182,7	-42,1
н-Бутан	C ₄ H ₁₀	58,124	21,50	2,703	-138,4	-0,5
Этилен	C ₂ H ₄	28,054	22,24	1,26	-169,2	-103,7
Пропилен	C ₃ H ₆	42,081	21,96	1,915	-187,7	-47,8
Ацетилен	C ₂ H ₂	26,038	22,22	1,173	-80,8	возг. -83,8
Водород	H ₂	2,016	22,43	0,09	-259,2	-252,7
Азот	N ₂	28,013	22,4	1,251	-210	-195,8
Оксид азота	NO	30,006	22,39	1,34	-163,7	-151,8
Сероводород	H ₂ S	34,08	22,14	1,539	-85,6	-60,7
Аммиак	NH ₃	17,031	22,08	0,771	-77,7	-33,35
Диоксид серы	SO ₂	64,063	21,89	2,927	-72,7	-10,08
Серный ангидрид	SO ₃	80,062	22,49	3,60	16,8	44,8
Кислород	O ₂	31,999	22,39	1,429	-218,4	-182,9
Озон	O ₃	47,998	21,60	1,658	-251,5	-111,5
Хлористый водород	HCl	36,461	22,25	1,639	-112	-84
Хлор	Cl ₂	70,906	22,02	3,214	-102	-34
Фтор	F ₂	37,997	22,42	1,695	-223	-187
Вода (пар)	H ₂ O	18,015	22,45	0,768	0	100
Гелий	He	4,003	22,42	0,178	-272,2 (2,6 МПа)	-268,9

Обозначения. M — молекулярная масса газа; V_0 — объем, занимаемый одним молем газа при нормальных условиях; ρ — плотность газа при нормальных условиях; $t_{пл}$ — температура плавления и $t_{кип}$ — температура кипения газа при давлении 101 325 Па.

Таблица 5. Количество и состав продуктов горения

Горючее вещество	Состав продуктов горения, м ³ /кг			Кол-во продуктов горения		
	CO ₂	H ₂ O	N ₂	кг/кг	м ³ /кг	м ³ /м ³
Акриловая кислота	0,96	0,62	3,50	6,76	5,08	—
Амилацетат	1,20	1,20	6,16	11,03	8,56	—
Амиловый спирт	1,27	1,53	7,20	12,72	10,00	—
Аммиак	—	1,97	3,71	6,21	5,68	4,32
Анилин	1,44	0,84	7,06	12,34	9,34	—
Ацетилен	1,73	0,86	8,11	14,20	10,70	12,40
Ацетон	1,16	1,16	5,82	10,48	8,14	—
Бензин	1,58	1,67	9,10	5,83	12,35	—
Бензол	1,73	0,86	8,11	4,20	10,70	—
Битум	1,49	1,16	7,74	6,88	10,39	—
Бумага, хлопок, хлопчатобумажные ткани	0,83	0,69	3,12	6,17	4,64	—
Бутан	1,54	1,93	9,44	16,38	12,91	33,44
Бутилацетат	1,16	1,16	5,82	10,48	8,14	—
Бутиловый спирт	1,21	1,51	6,80	12,10	9,52	—
Водород	—	11,20	21,00	34,97	32,20	2,38
Гексан	1,56	1,82	9,33	16,18	12,71	48,72
Глицерин	0,73	0,97	3,20	6,21	4,90	—
Дизельное топливо (соляровое масло)	1,60	1,50	8,85	15,41	11,95	—
Диэтиловый эфир	1,21	1,51	6,83	12,54	9,55	—
Древесина при W = 10 %	0,84	0,74	3,28	6,35	4,86	—
Древесина при W = 20 %	0,74	0,75	2,93	5,73	4,42	—
Древесина при W = 30 %	0,65	0,78	2,56	5,10	3,99	—
Капролактam	1,20	7,10	6,24	11,50	8,54	—
Каучук натуральный	1,50	1,35	7,91	13,79	10,76	—
Каучук синтетический	1,61	1,18	8,03	14,16	10,82	—
Керосин	1,61	1,70	8,98	15,74	12,29	—

Окончание табл. 5

Горючее вещество	Состав продуктов горения, м ³ /кг			Кол-во продуктов горения		
	CO ₂	H ₂ O	N ₂	кг/кг	м ³ /кг	м ³ /м ³
Кинопленка нитроцеллюлозная	0,80	0,60	2,92	5,71	4,43	—
Кинопленка триацетатная	0,91	0,64	3,42	6,58	4,97	—
Мазут	1,65	1,40	8,81	15,40	11,86	—
Метан	1,40	2,80	10,52	18,15	14,72	10,52
Метилловый спирт	0,70	1,42	3,94	7,40	6,06	8,64
Нефть	1,57	1,57	8,72	15,25	11,86	—
Пентан	1,55	1,87	9,36	16,27	12,78	—
Полистирол	1,72	0,86	8,10	14,15	10,68	—
Полипропилен	1,60	1,60	9,02	15,74	12,22	—
Полиэтилен	1,60	1,60	9,02	15,74	12,22	—
Пенополиуретан	1,06	0,79	4,69	8,58	6,55	—
Скипидар	1,65	1,32	8,66	15,11	11,63	—
Стирол	1,72	0,86	8,10	14,15	10,68	—
Толуол	1,86	1,06	9,02	15,00	11,94	—
Торф при W = 10 %	0,98	0,67	4,01	7,41	5,66	—
Торф при W = 20 %	0,87	0,71	3,56	6,74	5,14	—
Торф при W = 30 %	0,76	0,74	3,12	5,99	4,62	—
Этиловый спирт	0,98	1,46	5,50	9,97	7,94	—
Этиленгликоль	0,72	1,08	3,25	6,35	5,06	—

Таблица 6. Теоретическое количество воздуха

Горючее вещество	Количество воздуха		
	кг/кг	м ³ /кг	м ³ /м ³
Акриловая кислота	5,74	4,44	—
Акриловометилловый эфир	7,72	5,58	—
Амиллацетат	10,10	7,80	—
Амиловый спирт	11,76	9,10	—
Аммиак	6,10	4,70	3,57

Продолжение табл. 6

Горючее вещество	Количество воздуха		
	кг/кг	м ³ /кг	м ³ /м ³
Анилин	11,50	8,90	—
Ацетилен	13,27	10,25	11,90
Ацетон	9,50	7,35	—
Бензин	15,00	11,60	—
Бензол	13,27	10,25	—
Битум	13,19	9,45	—
Бумага, хлопок, хлопчатобумажн. ткани	5,10	3,95	—
Буган	15,45	11,94	30,94
Бутилацетат	9,50	7,35	—
Бутиловый спирт	11,10	8,64	—
Водород	34,50	26,60	2,38
Гексан	15,20	11,79	45,22
Глицерин	5,24	4,06	—
Дизельное топливо (соляровое масло)	14,60	11,5	—
Диэтиловый эфир	11,08	8,65	—
Древесина при $W = 10\%$	5,43	4,20	—
Древесина при $W = 20\%$	4,84	3,74	—
Древесина при $W = 30\%$	4,58	3,54	—
Капролактam	10,00	7,76	—
Каучук натуральный	12,93	10,00	—
Каучук синтетический	13,15	10,16	—
Керосин	14,70	11,36	—
Кинопленка нитроцеллюлозная	4,68	3,62	—
Кинопленка триацетатная	6,05	4,34	—
Мазут	14,60	11,30	—
Метан	17,20	13,32	9,52
Метилловый спирт	6,47	4,99	7,14
Нефть	14,60	11,80	—
Пентан	15,30	11,85	—

Окончание табл. 6

Горючее вещество	Количество воздуха		
	кг/кг	м ³ /кг	м ³ /м ³
Полистирол	14,30	10,25	—
Полипропилен	15,90	11,42	—
Полиэтилен	15,90	11,42	—
Пенополиуретан	7,77	6,00	—
Скипидар	14,20	10,96	—
Стирол	15,30	11,85	—
Толуол	13,50	10,46	—
Торф при $W = 10\%$	6,60	6,01	—
Торф при $W = 20\%$	5,86	4,54	—
Торф при $W = 30\%$	5,14	3,96	—
Этиловый спирт	9,00	6,95	—
Этиленгликоль	5,37	4,16	—

Таблица 7. Атомный вес некоторых элементов

Название	Химический знак	Порядковый номер	Атомный вес
Азот	N	7	14
Аргон	Ar	18	39,95
Водород	H	1	1,01
Гелий	He	2	4,0
Йод	I	53	126,9
Кислород	O	8	16
Неон	Ne	10	20,18
Сера	S	16	32,06
Углерод	C	6	12,01
Фосфор	P	15	30,97
Фтор	F	9	19,0
Бром	Br	35	79,9
Хлор	Cl	17	35,45

Таблица 8. Теплота горения некоторых веществ

Горючее вещество или материал	Низшая теплота горения Q_H^p , кДж/кг	Горючее вещество или материал	Низшая теплота горения Q_H^p , кДж/кг
Амилацетат	33 533,5	Каучук натуральный	44 833,0
Амиловый спирт	39 046,6	Каучук синтетический	45 252,0
Анилин	34 777,0	Керосин	43 157,01
Ацетилен	56 000,0	Кинолентка нитроцеллюлозная	15 084,0
Ацетон	30 969,0		
Бензин	43 576,0	Кинолентка триацетатная	18 779,6
Бензол	40 807,0	Мазут	41 900,0
Битум		Масло соляровое	43 069,0
		Метан	35 800,0
Бумага, хлопок, хлопчатобумажные ткани	13 408,0	Нефть	46 090,0
Бутан	45 800	Полистирол	38 967,0
Бутиловый спирт	36 144,9	Полиэтилен	47 137,5
Древесина при влажности, %		Пенополиуретан	243 012,0
$W = 10$	16 500,0	Резина	335 120,0
$W = 20$	14 400,0	Толуол	42 355,4
$W = 30$	12 200,0	Торф влажностью $W = 19\%$	16 613,3
Линолеум	33 520	Хлопок	15 700,0

Таблица 9. Теплота образования и горения некоторых веществ

Вещество	Теплота образования, кДж/моль	Теплота горения, кДж/моль
Альдегид муравьиный (ж)	121,1	561,5
уксусный (ж)	166,3	1173,2
Аммиак (газ)	46,1	384,2
Анилин (ж)	29,7	3484,0
Антрацен (тв)	-101,4	7102,0
Ацетилен (газ)	-224,6	1307,3
Ацетон (ж)	248,1	1789,0
Бензол (ж)	-34,8	3282,4
Бутадиен-1,3 (ж)	-104,3	2547,9
н-Бутан (газ)	132,4	2882,3
н-Бутан (ж)	153,8	2863,0
Бутен-1 (газ)	6,3	2723,9
Винилхлорид (ж)	-37,7	1259,9
Винилхлорид (ж)	-17,2	1239,4
Вода (ж)	286,6	—
Вода (газ)	242,2	—
н-Гексан (ж)	167,2	4150,6
н-Гептан (ж)	239,7	4814,3
Глицерин (ж)	675,4	1658,8
Двуокись серы (газ)	297,5	—
углерода (газ)	396,6	—
Диоксан (ж)	375,4	2354,8
Дифенил (тв)	-80,4	6258,2
Изобутан (ж)	159,2	2857,6
Кислота бензойная (тв)	394,3	3233,8
масляная (ж)	525,0	2178,8
муравьиная (ж)	419,0	263,1
олеиновая (тв)	625,1	11183,1
пропионовая (ж)	458,4	1589,3
стеариновая (тв)	937,7	11304,6
уксусная (ж)	485,6	942,7

Окончание табл. 9

Вещество	Теплота образования, кДж/моль	Теплота горения, кДж/моль
Метан (газ)	75,0	891,5
Мочевина (тв)	—	636,9
Нафталин (тв)	-62,8	5161,2
Нитроэтан (ж)	144,1	1364,3
Оксид углерода (газ)	112,7	283,2
н-Пентан (ж)	184,4	3515,0
Пропан (газ)	109,4	2223,2
Пропан (ж)	125,3	2209,0
Сероводород (газ)	201,1	338,5
Серовуглерод (ж)	-88,0	979,6
Спирт		
н-амиловый (ж)	359,1	3297,5
н-бутиловый (ж)	341,5	2677,4
н-гексиловый (ж)	385,1	3996,8
метиловый (ж)	239,0	726,6
пропиловый (ж)	307,1	2019,6
этиловый (ж)	278,2	1374,3
Тиофен (ж)	-81,7	2536,2
Тетралин (тв)	81,7	5597,4
Толуол (ж)	4,19	3921,8
Фенол (тв)	171,4	3067,1
Этан (газ)	88,4	1562,0
Этилбензол (ж)	33,1	4567,5
Этилен (газ)	-48,6	1391,1
Этиленгликоль (ж)	455,4	1152,2
Эфир		
диметиловый (ж)	207,8	1443,9
диэтиловый (ж)	283,2	2730,6
уксусноамиловый (ж)	594,7	4189,8
уксуснобутиловый (ж)	542,2	3551,4
уксуснометиловый (ж)	411,9	1635,8
уксусноэтиловый (ж)	480,2	2256,3

Таблица 10. Значение констант уравнения Антуана

Вещество	Химическая формула	M	Константы уравнения Антуана				
			A	B	C	$D_0, \text{см}^2/\text{с}$	n
н-Амилацетат	$\text{C}_7\text{H}_{14}\text{O}_2$	130,196	7,16870	1579,510	221365	0,0520	1,87
Амилен	C_5H_{10}	70,134	6,78568	1014,294	229,783	0,0690	1,84
н-Амиловый спирт	$\text{C}_5\text{H}_{12}\text{O}$	88,149	7,18246	1287,625	161,330	0,0661	1,87
Аммиак	NH_3	17,030	—	—	—	0,198	1,88
Анилин	$\text{C}_6\text{H}_7\text{N}$	93,128	6,92129	1457,020	176,195	0,0622	1,87
Ацетальдегид	$\text{C}_2\text{H}_4\text{O}$	44,053	7,19160	1093,537	233,413	0,11	1,83
Ацетилен	C_2H_2	26,038	—	—	—	0,18	1,79
Ацетон	$\text{C}_3\text{H}_6\text{O}$	58,080	7,25058	1281,721	237,088	0,19	1,90
Бензол	C_6H_6	78,113	6,48898 6,98426	902,275 1252,776	178,099 225,178	0,0775	1,86
Бутадиен 1,3	C_4H_6	54,091	—	—	—	0,0806	1,82
н-Бутан	C_4H_{10}	58,123	—	—	—	0,0605	1,87
Бутен-1	C_4H_8	56,107	—	—	—	0,0801	1,83
транс-Бутен-2	C_4H_8	56,107	—	—	—	0,0801	1,82
н-Бутилацетат	$\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_2$	116,160	7,00641	1340,743	199,757	0,0574	1,87
н-Бутиловый спирт	$\text{C}_4\text{H}_{10}\text{O}$	74,122	9,59730	2664,684	279,638	0,0681	1,86
Водород	H_2	2,016	—	—	—	0,66	1,70
Винилхлорид	$\text{C}_2\text{H}_3\text{Cl}$	62,499	—	—	—	0,104	1,82
н-Гексадекан	$\text{C}_{16}\text{H}_{34}$	226,445	6,78749	1656,405	136,869	0,0347	1,86

Вещество	Химическая формула	M	Константы уравнения Антуана				
			A	B	C	$D_0, \text{см}^2/\text{с}$	n
н-Гексан	C_6H_{14}	86,177	6,87024	1166,274	223,661	0,0663	1,55
н-Гексиловый спирт	$\text{C}_6\text{H}_{14}\text{O}$	102,176	7,27800	1420,273	165,469	0,0588	1,87
н-Гептан	C_7H_{16}	100,203	6,95154	1295,405	219,819	0,0609	1,54
Гидразин	N_2H_4	32,045	8,87325	2266,447	266,316	0,167	1,86
Глицерин	$\text{C}_3\text{H}_8\text{O}_3$	92,094	9,05297	3074,220	214,712	0,08	1,9
н-Декан	$\text{C}_{10}\text{H}_{22}$	142,284	7,39530	1809,975	227,700	0,0502	1,45
Дивиниловый эфир	$\text{C}_4\text{H}_6\text{O}$	70,091	6,98810	1055,259	228,589	0,0765	1,84
Диметиловый эфир	$\text{C}_2\text{H}_6\text{O}$	46,069	—	—	—	0,108	1,85
Диметилформамид	$\text{C}_3\text{H}_7\text{NO}_3$	73,094	7,03446	1482,985	204,342	0,0898	1,87
Диоксан-1,4	$\text{C}_4\text{H}_8\text{O}_2$	88,106	7,51611	1632,425	250,725	0,0758	1,85
Дифтордихлорметан	CF_2Cl_2	120,914	—	—	—	0,0806	1,81
1,2-Дихлорэтан	$\text{C}_2\text{H}_4\text{Cl}_2$	98,960	7,66135	1640,179	259,715	0,845	1,86
Диэтиламин	$\text{C}_4\text{H}_{11}\text{N}$	73,138	7,22314	1267,557	236,329	0,0756	1,85
Диэтиловый эфир	$\text{C}_4\text{H}_{10}\text{O}$	74,122	6,99790	1098,945	232,372	0,0772	2,14
н-Додекан	$\text{C}_{12}\text{H}_{26}$	170,337	8,17081	2463,739	253,884	0,0399	1,88
Изобутан	C_4H_{10}	58,123	—	—	—	0,0819	1,87
Изобутелен	C_4H_8	56,11	—	—	—	0,0801	1,82
Изобутиловый спирт	$\text{C}_4\text{H}_{10}\text{O}$	74,122	8,70512	2058,392	245,642	0,0756	1,87
Изопентан	C_5H_{12}	72,150	6,79306	1022,551	233,493	0,0700	1,76

Вещество	Химическая формула	M	Константы уравнения Антуана				
			A	B	C	$D_0, \text{см}^2/\text{с}$	n
Изопропилбензол	C_9H_{12}	120,194	6,93773	1460,668	207,652	0,0615	1,87
Изопропиловый спирт	$\text{C}_3\text{H}_8\text{O}$	60,096	8,38,562	1733,000	232,380	0,831	1,92
м-Ксилол	C_8H_{10}	106,167	7,00849	1461,925	215,073	0,0671	1,87
о-Ксилол	C_8H_{10}	106,167	6,99891	1474,679	213,686	0,0671	1,88
п-Ксилол	C_8H_{10}	106,167	6,99184	1454,328	215,411	0,0671	1,87
Метан	CH_4	16,0426	—	—	—	0,196	1,76
Метиловый спирт	CH_4O	32,042	8,22777	1660,454	245,818	0,129	2,08
Метилэтилкетон	$\text{C}_4\text{H}_8\text{O}$	72,107	7,02453	1292,791	232,340	0,0760	1,86
Нафталин	C_{10}H_8	128,173	10,55455 7,67291	3123,337 2206,690	243,569 245,127	0,0622	1,89
н-Нонан	C_9H_{20}	128,257	7,05283	1510,695	211,502	0,0499	1,57
Оксид углерода	CO	28,0104	—	—	—	0,149	1,72
Оксид этилена	$\text{C}_2\text{H}_4\text{O}$	44,0530	—	—	—	0,110	1,83
н-Октан	C_8H_{18}	114,230	6,96903	1379,556	211,896	0,0503	1,77
н-Гептадекан	$\text{C}_{15}\text{H}_{32}$	212,418	6,94237	1739,084	157,545	0,0358	1,90
н-Пентан	C_5H_{12}	72,150	6,84715	1062,555	231,805	0,0729	1,83
*-Пиколин	$\text{C}_6\text{H}_7\text{N}$	93,128	7,30064	1632,315	224,787	0,0754	1,88
*Пиродин	$\text{C}_6\text{H}_5\text{N}$	79,101	6,78610	1217,730	196,342	0,0828	1,87
Пропан	C_3H_8	44,096	—	—	—	0,0977	1,80

Вещество	Химическая формула	M	Константы уравнения Антуана				
			A	B	C	$D_0, \text{см}^2/\text{с}$	n
Пропилен	C_3H_6	42,080	—	—	—	0,0962	1,82
н-Пропиловый спирт	$\text{C}_3\text{H}_8\text{O}$	60,096	8,31708	1751,981	225,125	0,085	1,88
Сероводород	H_2S	34,076	—	—	—	0,141	1,82
Сероуглерод	CS_2	76,131	7,00048	1202,471	245,616	0,0890	1,69
Стирол	C_8H_8	104,161	7,94049	2113,057	272,986	0,0674	1,88
Тetraгидрофуран	$\text{C}_4\text{H}_8\text{O}$	72,107	5,99964	753,805	175,793	0,0588	1,84
н-Тетрадекан	$\text{C}_{14}\text{H}_{30}$	198,391	7,27514	1950,497	190,513	0,0370	1,89
Толуол	C_7H_8	92,140	6,95508	1345,087	219,516	0,0753	1,65
н-Тридекан	$\text{C}_{13}\text{H}_{28}$	184,364	7,96895	2468,910	250,310	0,0384	1,89
2.2.4-Триметилпентан	C_8H_{18}	114,230	6,81171	1259,150	221,085	0,0427	1,86
Уксусная кислота	$\text{C}_2\text{H}_4\text{O}_2$	60,052	—	—	—	—	2
н-Ундекан	$\text{C}_{11}\text{H}_{24}$	153,311	7,68008	2102,959	242,574	0,0417	1,88
Формальдегид	CH_2O	30,026	6,28480	607,399	197,626	0,146	1,81
Фталевый ангидрид	$\text{C}_8\text{H}_4\text{O}_3$	148,118	7,99959	2879,067	277,501	0,0616	1,87
Фтортрихлорметан	CCl_3F	137,368	—	—	—	0,0603	1,83
Хлорбензол	$\text{C}_6\text{H}_5\text{Cl}$	112,558	7,26112	1607,316	235,351	0,0628	2,09
Хлорэтан	$\text{C}_2\text{H}_5\text{Cl}$	64,514	6,82723	954,119	229,554	0,0981	1,82
Циклогексан	C_6H_{12}	84,161	6,64788	1095,531	210,064	0,0648	1,89
Этан	C_2H_6	30,069	—	—	—	0,121	1,78

Вещество	Химическая формула	M	Константы уравнения Антуана				
			A	B	C	$D_0, \text{см}^2/\text{с}$	n
Этилацетат	$\text{C}_4\text{H}_8\text{O}_2$	88,106	6,992409	1200,297	214,262	0,0733	1,89
Этилбензол	C_8H_{10}	106,167	6,95904	1425,464	213,345	0,0671	1,87
Этилен	C_2H_4	28,054	—	—	—	0,109	1,80
Этиленгликоль	$\text{C}_2\text{H}_5\text{O}_2$	62,068	9,01261	2753,183	252,009	0,099	1,87
Этиловый спирт	$\text{C}_2\text{H}_6\text{O}$	76,069	8,68665	1918,508	252,125	0,110	1,51
Этилцеллозольв	$\text{C}_4\text{H}_{10}\text{O}_2$	90,122	8,74133	2392,56	273,15	0,0721	1,86
Бензин АИ-72 (зимний) ГОСТ 2084—67	$\text{C}_{6,991}\text{H}_{13,108}$	97,2	5,07020	682,876	222,066	-60/85	2
Бензин АИ-93 (летний) ГОСТ 2084—67	$\text{C}_{7,024}\text{H}_{13,706}$	98,2	4,99831	664,976	221,695	-60/95	2
Бензин АИ-93 (зимний) ГОСТ 2084—67	$\text{C}_{6,911}\text{H}_{12,168}$	95,3	5,14031	695,019	223,220	-60/90	2
Бензин авиационный Б-70 ГОСТ 1012—72	$\text{C}_{7,267}\text{H}_{14,796}$	102,2	8,41944	2629,65	384,195	-40/110	2
Дизельное топливо «З» ГОСТ 305—73	$\text{C}_{12,343}\text{H}_{23,88}$	172,3	5,95338	1255,73	199,523	40/210	2
Дизельное топливо «Л» ГОСТ 305—73	$\text{C}_{14,511}\text{H}_{29,12}$	203,6	5,87629	1314,04	192,473	60/240	2
Керосин осветительный КО-20 ГОСТ 4753—68	$\text{C}_{13,595}\text{H}_{26,86}$	191,7	5,69697	1211,73	194,677	40/240	2
Керосин осветительный КО-22 ГОСТ 4753—68	$\text{C}_{10,914}\text{H}_{21,83}$	153,1	6,47119	1394,72	204,260	40/190	2
Керосин осветительный КО-25 ГОСТ 4753—68	$\text{C}_{11,054}\text{H}_{21,75}$	154,7	6,00016	1223,85	203,341	40/90	2
Ксилол (смесь изомеров) ГОСТ 9410—71	$\text{C}_{7,99}\text{H}_{9,98}$	106,0	7,05479	1478,16	220,535	0/50	2

Вещество	Химическая формула	M	Константы уравнения Антуана				
			A	B	C	D ₀ , см ² /с	n
Уайт-спирит ГОСТ 3134—52*	C _{10,5} H _{21,0}	147,3	8,01130	2218,3	273,15	20/80	
Масло трансформаторное ГОСТ 10121—76	C _{21,74} H _{42,28} S	303,9	7,75932	2524,17	174,010	164/343	2
Масло АМТ-300 ТУ 38-1Г-1—68	C _{21,74} H _{42,28} S _{0,04}	312,9	6,99959	2240,001	167,85	170/376	2
Масло АМТ-300Т ТУ 38 101242—72	C _{19,04} H _{24,58} S _{0,196} N _{0,07}	260,3	6,49540	2023,77	2023,77	171/396	2
Растворитель М (н-бутилацетат-30; этилацетат-5; этиловый спирт-60; изобутиловый спирт-5)	C _{2,761} H _{7,147} O _{1,187}	59,4	8,93202	2083,566	2083,566	0/50	2
Растворитель Р-4 (ксилол-15; толуол-70; ацетон-15)	C _{6,231} H _{7,798} O _{0,223}	86,3	7,15273	1415,199	1415,199	-15/100	2
Растворитель РМЛ-218 МРТУ 6-10-729—68 (н-бутилацетат-9; этилацетат-16; ксилол-21,5; толуол-21,5; этиловый спирт-16; н-бутиловый спирт-3; этилцеллозольв-13)	C _{4,791} H _{8,318} O _{0,971}	81,5	8,07751	1761,043	1761,043	0/50	2
Растворитель РМЛ ТУКУ 467—56 (толуол-10; этиловый спирт-64; н-бутиловый спирт-10; этилцеллозольв-16)	C _{2,645} H _{5,910} O _{1,038}	55,2	9,57161	2487,728	2487,728	0/50	2
Растворитель РМЛ-215 ТУ 6-10-1013—70 (н-бутилацетат-18; ксилол-25; толуол-25; этиловый спирт-16; н-бутиловый спирт-15; этилцеллозольв-17)	C _{5,962} H _{9,779} O _{0,845}	95,0	7,71160	1699,687	1699,687	0/50	2
Растворитель Р-4 (н-бутилацетат-12; толуол-62; ацетон-26)	C _{5,452} H _{7,606} O _{0,535}	81,7	7,17192	1373,667	1373,667	-15/100	2

Таблица 11. Концентрационные пределы воспламенения

Вещество	Пределы воспламенения, % об.	
	нижний	верхний
Метан	5,00	15,00
Этан	3,22	12,45
Пропан	2,10	9,50
Бутан	1,80	8,41
изо-Бутан	1,86	8,44
изо-Пентан	1,32	—
Гексан	1,25	6,90
Гептан	1,00	6,00
Октан	0,95	—
Нонан	0,83	—
Декан	0,67	—
Этилен	2,75	28,60
Пропилен	2,00	11,10
Бутилен	1,70	9,00
Амилен	1,60	—
Ацетилен	2,50	80,00
Бензол	1,41	6,75
Толуол	1,27	6,75
о-Ксилол	1,00	6,00
Циклопропан	2,40	10,40
Циклогексан	1,33	8,35
Метилциклогексан	1,15	—
Метиловый спирт	6,72	36,50
Этиловый спирт	3,28	18,95
Пропиловый спирт	2,55	—
изо-Пропиловый спирт	2,65	—
Бутиловый спирт	1,70	—
изо-Бутиловый спирт	1,68	—
Амиловый спирт	1,19	—
изо-Амиловый спирт	1,20	—
Ацетальдегид	3,97	—

Окончание табл. 11

Вещество	Пределы воспламенения, % об.	
	нижний	верхний
Метилловый эфир	2,00	10,10
Этиловый эфир	1,85	36,50
Виниловый эфир	1,70	27,00
Ацетон	2,55	12,80
Метилэтилкетон	1,81	9,50
Метилбутилкетон	1,55	8,15
Метилформиат	5,05	22,70
Этилформиат	2,75	16,40
Метилацетат	3,15	15,60
Этилацетат	2,18	11,40
Пропилацетат	2,05	—
Изо-Пропилацетат	2,70	—
Бутилацетат	1,70	—
Амилацетат	1,10	—
Водород	4,00	74,20
Оксид углерода	12,50	74,20
Аммиак	15,50	27,00
Оксид этилена	3,00	80,00
Оксид пропилена	2,00	22,00
Диоксан	1,97	22,25
Диэтилпероксид	2,34	—
Сероуглерод	1,25	50,00
Сероводород	4,30	45,50
Хлористый метил	8,25	18,70
Хлористый винил	4,00	21,70
Хлористый этил	4,00	14,80
Хлористый амил	1,40	—
Ацетилендихлорид	9,70	12,80
Этилендихлорид	6,20	15,90
Бромистый метил	13,50	14,50
Бромистый этил	6,75	11,25

Таблица 12. Показатели пожарной опасности некоторых газов

Газ	Плотность по воздуху	Температура самовоспламенения, К	Пределы воспламенения, %	
			нижний	верхний
Аммиак	0,59	903	15,0	28,0
Ацетилен	0,9	608	2,0	81,0
Бутан	2,0	678	1,9	9,1
Бутилен	1,93	657	1,6	9,4
Водород	0,069	783	4,0	75,0
Метан	0,55	810	5,0	15,0
Оксид углерода	0,967	883	12,5	74,0
Оксид этилена	1,5	702	3,0	80,0
Оксид пропилена	2,0	673	2,0	22,0
Пропан	1,56	739	2,1	95,0
Пропилен	1,45	683	2,2	10,3
Сероводород	1,19	519	4,3	46,0
Этан	1,04	745	2,9	15,0
Этилен	0,97	813	3,0	32,0

Таблица 13. Показатели пожарной опасности некоторых жидкостей

Жидкость	Плотность, кг/м ³	Температура самовоспламенения, К	Температурные пределы воспламенения, К		Концентрационные пределы воспламенения, %	
			нижний (температура вспышки)	верхний	нижний	верхний
Анилин	1022	835	343	363	1,3	4,2
Альдегид уксусный	780	458	235	—	4,0	5,0
Ацетон	790	738	253	279	2,2	13,0
Бензол	879	813	259	283	1,4	7,1
Глицерин	1260	673	431	513	—	—

Окончание табл. 13

Жидкость	Плотность, кг/м ³	Температура самовоспламенения, К	Температурные пределы воспламенения, К		Концентрационные пределы воспламенения, %	
			нижний (температура вспышки)	верхний	нижний	верхний
Кислота уксусная (ледяная)	1049	727	308	349	3,3	22,0
Сероуглерод	1263	363	223	299	1,0	50,0
Спирт						
изоамиловый	816	628	310	335	1,07	5,0
бензиловый	1050	673	360	418	1,0	15,5
н-бутиловый	814	683	304	333	1,52	7,9
изобутиловый	820	828	299	323	1,89	7,3
метиловый	795		280	312	6,0	34,7
н-пропиловый	803	737	293	326	2,02	13,55
изопропиловый	785	643	281	310	2,25	11,65
этиловый	789	693	284	314	3,6	19,0
Стирол	902	803	299	332	1,08	6,2
Толуол	866	809	273	303	1,3	6,7
Этиленгликоль	1114	653	385	397	3,8	6,35
Эфир диэтиловый	713	437	228	386	1,7	49
Эфир уксусно-изоамиловый	870	703	276	330	0,2	4,35
Бензин	722—806	528—765	228—239	249—269	0,76—0,79	5,16—8,12
Нефть (бибийбатская)	730—1040	533	296	323	1,4	—
Нефть карагандская	730—1040	593	252	292	1,3	—
Уайт-спирит	760—790	523	306	341	0,7	5,6
Скипидар		573	578	599	0,8	—
Керосин тракторный		523	589	632	1,4	7,8

Таблица 14. Давление насыщенных паров некоторых индивидуальных веществ, Па

Вещество	133,332	1333,22	2666,44	5332,88	7999,32	13 332,2	26 664,4	53 328,8	10 1325
	Температура, К								
Ацетон	213,6	241,9	252,2	263,6	271,0	280,7	295,7	312,5	329,5
Альдегид уксусный	191,5	216,2	225,2	235,2	241,6	250,4	263,0	277,9	293,2
Ангидрид уксусный	274,7	309,0	321,8	335,1	343,8	355,2	373,0	392,8	412,6
Акриловая кислота	276,5	312,0	325,0	339,2	348,0	359,1	376,3	395,0	414,0
Спирт аллиловый	253,0	283,5	294,7	306,4	313,3	323,0	337,5	353,2	369,6
Спирт амиловый	286,6	317,9	328,8	241,0	348,5	358,8	375,0	392,8	410,8
Спирт бензиловый	331,0	365,6	378,8	392,8	402,3	414,7	433,0	456,0	477,7
Бензол	236,3	261,5	270,4	280,6	288,4	299,1	315,2	333,6	353,1
Спирт бутиловый	271,8	303,2	314,5	326,4	333,3	343,1	357,3	373,8	390,5
Спирт бутиловый (вторичный)	260,8	289,0	300,3	311,1	318,2	327,1	340,9	356,9	372,5
Спирт бутиловый (третичный)	252,6	278,5	287,3	297,5	304,0	312,8	325,7	341,0	355,9
Спирт изобутиловый	264,0	294,7	307,3	317,1	324,7	334,5	348,9	364,4	381,0
Бромистый этил	198,7	225,5	235,2	246,3	253,5	263,0	287,5	294,0	311,4
Бутилбензол	295,7	335,0	349,3	365,4	375,6	389,2	409,9	432,2	456,1
Бутилформиат	246,6	279,1	291,0	304,6	312,8	324,0	340,9	359,2	379,0
Метилэтилкетон	224,2	255,3	266,5	279,0	287,0	298,0	314,6	333,0	352,6
Метилциклогексан	237,1	269,8	281,7	295,0	303,5	315,1	332,6	352,6	373,9
3-Метил-2-бутанол	253,1	281,3	291,3	302,6	309,2	318,5	332	346,8	361,9

Вещество	133,332	1333,22	2666,44	5332,88	7999,32	13 332,2	26 664,4	53 328,8	10 1325
	Температура, К								
2-Метилбутан	190,1	216,0	225,7	236,5	243,4		267,1	283,5	300,8
Метилловый спирт	229,0	256,8	267,0	278,0	285,1	294,2	307,8	322,9	337,7
Оксид этилена	198,0	224,0	233,7	244,6	251,7	261,0	275,1	290,8	307,5
Октан	259,0	281,3	304,5	318,1	326,8	338,7	356,6	377,0	398,6
Пропилбензол	279,3	316,4	329,8	344,6	354,1	—	386,5	408,7	432,2
Спирт н-пропиловый	258,0	287,7	298,3	309,4	316,5	325,8	339,8	355,0	370,8
Спирт пропиловый (вторичный)	299,1	275,4	285,7	296,8	303,5	312,5	326,0	340,8	355,5
Стирол	266,0	303,8	317,6	332,8	342,5	355,0	374,3	395,5	418,2
Сероуглерод	199,2	228,3	238,7	250,5	257,7	267,9	383,4	301,0	319,5
Толуол	246,3	279,4	291,4	304,8	313,3	324,9	342,5	262,5	383,6
Эфир уксуснометилловый	215,8	243,7	253,9	265,1	272,5	282,4	297,0	313,0	330,8
Эфир уксуснопропиловый	246,3	278,4	289,0	301,8	310,0	320,8	337,0	—	374,8
Эфир уксусноэтиловый	229,6	259,5	270,0	282,1	289,6	300,0	315,0	332,3	350,1
Этиловый спирт	241,7	270,7	281,0	292,0	299,0	307,9	321,4	336,5	351,4
Этилциклопентан	240,8	272,9	284,7	298,0	306,4	318,0	335,4	355,3	381,4
Этилбензол	263,2	298,9	311,6	325,8	334,8	347,1	365,7	386,8	409,2
Диэтиловый эфир	198,7	224,9	234,5	245,2	251,2	261,5	275,2	290,9	307,6

Таблица 15. Величина параметров k и l для вычисления температурных пределов воспламенения некоторых жидкостей

Гомологический ряд	Формула $n = 1, 2, 3, 4, \dots$	Параметры	
		k	l
Нормальные алканы	$\text{CH}_3-(\text{CH}_2)_n-\text{CH}_3$	$\frac{0,6957}{0,7874}$	$\frac{73,8}{50,3}$
2-Метилалканы	$(\text{CH}_3)_2\text{CH}(\text{CH}_2)_n-\text{CH}_3$	$\frac{0,6885}{0,7900}$	$\frac{74,9}{52,2}$
Нормальные 1-алканы	$\text{CH}_2 = \text{CH}-(\text{CH}_2)_n-\text{CH}_3$	$\frac{0,6867}{0,7876}$	$\frac{74,5}{49,5}$
Нормальные жирные спирты	$\text{CH}_3-(\text{CH}_2)_n-\text{OH}$	$\frac{0,5476}{0,6928}$	$\frac{33,7}{15,0}$
2-Метилкарбинолы	$(\text{CH}_3)_2\text{CH}-(\text{CH}_2)_n-\text{OH}$	$\frac{0,6582}{0,7278}$	$\frac{44,1}{21,5}$
н-Алкилформиаты	$\text{HCOO}-(\text{CH}_2)_n-\text{CH}_3$	$\frac{0,5359}{0,6050}$	$\frac{47,6}{25,0}$
н-Акилацетаты	$\text{CH}_3\text{COO}-(\text{CH}_2)_n-\text{CH}_3$	$\frac{0,5940}{0,7761}$	$\frac{50,9}{40,8}$

Примечание. Числитель параметра относится к нижнему пределу воспламенения, знаменатель — к верхнему температурному пределу воспламенения

Таблица 16. Физические параметры сухого воздуха при атмосферном давлении ($1 \cdot 10^5$ Па)

$t, ^\circ\text{C}$	$\rho, \text{кг/м}^3$	$C_p, \text{кДж} \cdot \text{кг}^{-1} \text{K}^{-1}$	$\lambda \cdot 10^2, \text{Вт} \cdot \text{м}^{-1} \text{K}^{-1}$	$\mu \cdot 10^6, \text{Па} \cdot \text{с}$
-40	1,515	1,013	2,12	15,21
-20	1,329	1,009	2,28	16,91
0	1,295	1,005	2,44	17,17
20	1,205	1,005	2,59	18,15

Окончание табл. 16

$t, ^\circ\text{C}$	$\rho, \text{кг/м}^3$	$C_p, \text{кДж} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	$\lambda \cdot 10^2, \text{Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	$\mu \cdot 10^6, \text{Па} \cdot \text{с}$
40	1,128	1,005	2,76	19,13
60	1,060	1,005	2,90	20,11
80	1,000	1,009	3,05	21,09
100	0,946	1,009	3,21	21,88
120	0,898	1,009	3,24	22,86
140	0,854	1,013	3,49	23,74
160	0,815	1,017	3,64	24,52
180	0,779	1,022	3,78	25,31
200	0,776	1,026	3,94	26,00
250	0,674	1,038	4,27	27,37
300	0,615	1,047	4,61	29,72
350	0,566	1,059	4,91	31,39
400	0,524	1,068	5,21	33,06
500	0,456	1,093	5,74	36,20
600	0,404	1,114	6,22	39,14
700	0,362	1,135	6,71	41,79
800	0,329	1,156	7,18	44,34
900	0,301	1,172	7,63	46,05
1000	0,277	1,185	8,07	51,21

Таблица 17. Давление насыщенных паров индивидуальных жидкостей в зависимости от температуры

Вещество	Температура (°C) при давлении (мм рт. ст.)									
	1	5	10	20	40	60	100	200	400	760
Ацетон	-59,4	-40,5	-31,1	-20,8	-9,4	-2,0	-7,7	+22,7	+39,5	+56,5
Альдегид уксусный	-81,5	-65,1	-56,8	-47,8	-37,8	-31,4	-22,6	-10,0	+4,9	+20,2
Ангидрид уксусный	+1,7	+24,8	+36,0	+48,8	+62,1	+70,8	+82,2	+100,0	+119,8	+139,6
Акриловая кислота	+3,5	+27,3	+39,0	+52,0	+66,2	+75,0	+86,1	+103,3	+122,0	+141,0
Бензол	-36,7	-19,6	-11,5	-2,6	+7,6	+15,4	+26,1	+42,2	+60,6	+80,1
Бензиловый спирт	+57,0	+80,8	+92,6	+105,8	+119,8	+129,3	+141,7	+160,0	+183,0	+204,7
Бутилбензол	+22,7	+48,8	+62,0	+76,3	+92,4	+102,6	+116,2	+136,9	+159,2	+188,1
Бромистый этил	-74,3	-56,6	-47,5	-37,8	-26,7	-19,5	-10,0	+14,5	+21,0	+38,4
Бутилформиат	-26,4	-4,7	+6,1	+18,0	+31,6	+39,8	+51,0	+67,9	+86,2	+106,0
Метилэтилкетон	-48,8	-28,0	-17,7	-6,5	+6,0	+14,0	+25,0	+41,6	+60,0	+79,6
Метилциклогексан	-35,9	-14,0	-3,2	+8,7	+22,0	+30,5	+42,1	+59,6	+79,6	+100,6
3-метил — 2-бутанон	-19,9	-1,0	+8,3	+18,3	+29,6	+36,2	+45,5	+59,0	+73,8	+88,9
2-метилбутан	-82,9	-65,8	-57,0	-47,3	-36,5	-29,6	-20,0	-5,9	+105	+27,8
Окись пропилена	-75,0	-57,8	-49,0	-36,3	-28,4	-21,3	-12,0	+2,1	+17,8	-34,5
Октан	+14,0	+8,3	+19,2	+31,5	+45,1	+53,8	+65,7	+83,6	+104,0	+125,6
Пропилбензол	+6,3	+31,3	+43,4	+56,8	+71,6	+81,1	+94,0	+113,5	+135,7	+159,2
Спирт амиловый	+13,6	+34,7	+44,9	+55,8	+68,0	+75,8	+85,6	+100,0	+119,9	+137,8
Спирт бензиловый	+58,0	+80,8	+92,6	+105,8	+119,8	+129,0	+141,7	+160,0	+183,0	+204,7

Вещество	Температура (°С) при давлении (мм рт. ст.)									
	1	5	10	20	40	60	100	200	400	760
Спирт бутиловый (вторичный)	-12,2	+7,2	+16,9	+27,3	+38,1	+45,2	+54,1	+67,9	+83,9	+99,5
Спирт изобутиловый	-9,0	+11,0	+21,7	+32,4	+44,1	+51,7	+61,5	+75,9	+91,4	+108,0
Спирт бутиловый (третичный)	-20,4	-3,0	+5,5	+14,3	+24,5	+31,0	+39,8	+52,7	+68,0	+82,9
Спирт метиловый	-44,0	-25,3	-16,2	-6,0	+5,0	+12,1	+21,2	+34,8	+49,9	+64,7
Спирт пропиловый	-15,0	+5,0	+14,7	+25,5	+36,4	+43,5	+52,8	+66,8	+82,0	+97,8
Спирт пропиловый (вторичный)	-26,1	-7,0	+2,4	+12,7	+23,8	+30,5	+39,5	+53,0	+67,8	+82,5
Спирт этиловый	-31,3	-12,0	-2,3	+8,0	+19,0	+26,0	+34,9	+48,4	+63,5	+78,4
Стирол	-7,1	+18,0	+30,8	+44,6	+59,8	+69,0	+82,0	+101,3	+122,5	+145,2
Сероуглерод	-73,8	-54,3	-44,7	-34,3	-22,5	-15,3	-5,1	+10,4	+28,0	+46,5
Толуол	-26,7	-4,4	+6,4	+18,4	+31,8	+40,3	+51,9	+69,5	+89,5	+110,6
Уксуснометиловый эфир	-57,2	-38,6	-29,3	-19,1	-7,9	-0,5	+9,4	+24,0	+40,0	+57,8
Уксуснопропиловый эфир	-26,7	-5,4	+5,4	+16,0	+28,8	+37,0	+47,8	+64,0	+82,0	+101,8
Уксусноэтиловый эфир	-43,4	-23,5	-13,5	-3,0	+9,1	+16,6	+27,0	+42,0	+59,3	+77,1
Этилциклопентан	-32,2	-10,8	-0,1	+11,7	+25,0	+33,4	+45,0	+62,4	+82,9	+108,4
Этилбензол	-9,8	+13,9	+25,9	+38,6	+52,8	+61,8	+74,1	+92,7	+113,8	+136,2
Эфир диэтиловый	-74,3	-56,9	-48,1	-38,5	-27,7	-21,8	-11,5	+2,2	+17,9	+34,6
Хлористый бензол	-13,0	+10,6	+22,2	+35,3	+49,7	+58,3	+70,7	+89,4	+110,0	+132,2

Таблица 18. Основные физические константы некоторых газов

Название	M	ρ , кг/м ³	d	$t_{\text{пл}}$, °C	$t_{\text{кип}}$, °C	C_{p298K} , кДж/(моль · К)	$\lambda \cdot 2,38 \cdot 10^{-2}$, Т/(м · К)	$Q_{\text{н}}^c$, кДж/моль	ΔH_f^c , кДж/моль
Воздух	28,98	1,293	1	-213	-192	1	7,5	—	0
Ar	39,95	1,784	1,38	-189,3	-185,7	—	5,2	—	0
CO	28,01	1,25	0,967	-205	-192	29,15	7,2	283,2	-110,6
CO ₂	44,01	1,977	1,529	-56,6	78,5	37,13	5,3	—	396,9
CH ₄	16,04	0,717	0,555	-182,5	-161,6	35,79	10,9	890,95	75
C ₂ H ₆	30,07	1,357	1,049	-182,5	-88,6	52,7	7,3	1560,92	98,4
C ₃ H ₈	44,097	2,019	1,562	-187,4	-42,1	73,51	6,3	2221,52	103,9
n-C ₄ H ₁₀	58,124	2,703	2,091	-138,4	-0,5	97,78	5,6	2880,43	32,4
изоC ₄ H ₁₀	58,124	2,668	2,064	-159,6	-11,7	96,82	5,8	2873,44	—
n-C ₅ H ₁₂	72,151	3,457	2,674	-129,7	36,1	122,6	5,3	3539,1	116,4
n-C ₆ H ₁₂	86,178	3,84	2,97	-95,3	68,1	146,7	5	4197,7	167,2
C ₂ H ₄	28,054	1,26	0,975	-169,2	-103,7	—	7,4	1411,91	-52,28
C ₂ H ₂	26,038	1,173	0,9	-80,8	-83,8	43,93	6,8	1257	-226,75
C ₆ H ₆	78,114	3,48	2,69	5,5	80,1	81,67	4,4	3282,4	82,83
H ₂	2,016	0,09	0,07	-259,2	-252,7	28,83	53,4	286,02	0
H ₂ O (пар)	18,015	0,768	0,594	0	100	33,56	—	—	242,2
N ₂	28,013	1,251	0,967	-210	-195,8	29,10	7,5	—	0
Ne	20,183	0,9	0,696	-248,6	-245	—	—	—	0
O ₂	31,999	1,429	1,105	-218,4	-182,9	29,36	7,6	—	0
He	131,3	5,89	4,51	-112	-108,1	—	41,6	—	0
NH ₃	17	—	—	—	—	—	—	316,52	0
H ₂ S	76,14	1,263	2,6	-112,1	46,25	—	—	—	—

Обозначения. M — молекулярная масса газа; ρ — плотность при нормальных условиях; d — относительная масса (для воздуха равна 1,000); $t_{\text{пл}}$, °C и $t_{\text{кип}}$, °C — температура плавления и кипения, при давлении 101 325 Па; C_{p298} — теплоемкость; λ — теплопроводность при 373 К; $Q_{\text{н}}^c$ — теплота горения; ΔH_f^c — теплота образования.

Таблица 19. Средняя объемная теплоемкость газов

t, °C	Теплоемкость, кДж/(м ³ · К)								
	CO ₂	H ₂ O	N ₂	O ₂	SO ₂	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₂ H ₄
0	1,601	1,495	1,295	1,307	1,735	1,277	1,551	2,221	1,828
100	1,701	1,506	1,507	1,318	1,814	1,292	1,643	2,497	2,063
200	1,789	1,523	1,301	1,366	1,889	1,298	1,760	2,777	2,284
300	1,864	1,543	1,308	1,357	1,957	1,300	1,887	3,046	2,497
400	1,931	1,567	1,317	1,378	2,019	1,303	2,017	3,311	2,688
500	1,990	1,591	1,329	1,399	2,070	1,306	2,142	3,555	2,865
600	2,043	1,616	1,341	1,417	2,116	1,309	2,263	3,781	3,028
700	2,090	1,642	1,354	1,435	2,154	1,313	2,379	3,989	3,172
800	2,133	1,669	1,368	1,451	2,183	1,318	2,496	4,184	3,310
900	2,171	1,697	1,381	1,466	2,216	1,324	2,604	4,365	3,434
1000	2,205	1,724	1,393	1,478	2,237	1,330	2,701	4,533	3,550
1100	2,237	1,751	1,404	1,490	2,263	1,337	2,788	4,687	3,658
1200	2,265	1,778	1,415	1,502	2,279	1,344	2,865	4,829	3,757
1300	2,291	1,804	1,426	1,512	2,292	1,352	—	—	—
1400	2,315	1,829	1,436	1,521	2,313	1,360	—	—	—
1500	2,337	1,854	1,445	1,531	2,325	1,368	—	—	—
1600	2,357	1,877	1,454	1,539	2,342	1,376	—	—	—
1700	2,376	1,901	1,462	1,547	2,355	1,384	—	—	—
1800	2,393	1,923	1,470	1,555	2,367	1,393	—	—	—
1900	2,413	1,944	1,477	1,563	2,384	1,401	—	—	—
2000	2,424	1,964	1,484	1,570	2,397	1,409	—	—	—
2100	2,438	1,964	1,490	1,577	2,409	1,415	—	—	—
2200	2,450	2,002	1,496	1,584	2,426	1,424	—	—	—
2300	2,462	2,020	1,502	1,591	2,438	1,431	—	—	—
2400	2,473	2,038	1,505	1,597	2,455	1,438	—	—	—
2500	2,483	2,054	1,512	1,604	2,468	1,456	—	—	—
2600	2,495	2,071	1,528	1,614	2,485	—	—	—	—
2700	2,504	2,089	1,532	1,618	2,501	—	—	—	—
2800	2,512	2,106	1,537	1,624	2,518	—	—	—	—
2900	2,521	2,124	1,541	1,631	2,535	—	—	—	—
3000	2,530	2,142	1,545	1,638	2,552	—	—	—	—

Таблица 20. Энтальпия (теплосодержание) газов при постоянном давлении

t, °C	Теплосодержание, кДж/кмоль					
	O ₂	N ₂	Воздух	CO ₂	H ₂ O	SO ₂
0	0	0	0	0	0	0
100	2956,0	2917,5	2917,5	3814,1	1281,7	4081,1
200	5991,7	5849,3	5866,0	8019,6	6829,7	8505,7
300	9125,8	8819,9	8861,8	12 536,5	10 378,6	13 223,6
400	12 360,5	11 849,3	11 924,7	17 313,1	14 044,9	18 167,8
500	15 678,9	14 945,7	15 058,8	22 303,4	17 828,4	23 275,4
600	19 072,9	18 104,9	18 255,8	27 473,8	21 733,5	28 533,9
700	22 521,2	21 331,3	21 524,0	32 795,1	25 772,7	33 876,1
800	26 019,9	24 616,2	24 842,5	38 237,9	29 937,5	39 285,5
900	29 564,6	27 955,7	28 211,3	43 785,5	34 232,3	44 799,5
1000	33 142,9	31 337,0	31 621,9	49 442,0	38 648,5	50 321,9
1100	36 750,5	34 760,2	35 074,5	55 440,4	43 198,9	55 907,2
1200	40 391,6	38 221,2	38 560,6	60 922,6	47 807,9	61 492,4
1300	44 036,9	41 719,8	42 067,6	66 788,6	52 584,5	67 161,5
1400	47 724,1	45 252,0	45 629,1	72 654,6	57 403,0	72 797,1
1500	51 453,2	48 771,6	49 190,6	78 562,5	62 347,2	78 436,8
1600	55 182,3	52 375,0	52 794,0	84 554,2	67 333,3	84 135,2
1700	58 953,3	55 936,5	56 397,4	90 545,9	72 445,1	89 821,0
1800	62 766,2	59 539,9	60 000,8	96 579,5	77 598,8	95 557,1
1900	66 579,1	63 143,3	63 646,1	102 613,1	82 794,4	101 184,3
2000	70 392,0	66 788,6	67 333,3	108 646,7	88 073,8	107 012,6
2100	74 246,8	70 433,9	71 0 120,5	114 722,2	93 395,1	112 715,2
2200	78 101,6	74 131,1	74 707,7	120 839,6	98 758,3	118 451,3
2300	81 998,3	77 766,4	78 394,9	126 915,1	104 163,4	124 220,9
2400	85 936,9	81 453,6	82 124,0	133 032,5	109 631,3	130 024,1
2500	89 875,5	85 140,8	85 853,1	139 149,9	115 141,1	135 756,0
2600	94 015,2	89 003,9	89 330,8	145 325,9	119 398,2	141 513,0
2700	97 857,4	92 653,5	93 105,9	151 481,1	124 782,4	147 295,2
2800	101 833,7	96 437,0	96 789,0	157 560,7	130 342,5	152 985,3
2900	06124,2	100 488,7	100 488,7	163 795,5	135 848,2	158 813,6
3000	110 113,2	103 828,2	104 205,3	169 946,4	141 161,1	164 667,0

Таблица 21. Энтальпия (теплосодержание) газов при постоянном давлении

t, °C	Теплосодержание ΔH , кДж/м ³					
	O ₂	N ₂	Воздух	CO ₂	H ₂ O	SO ₂
0	0	0	0	0	0	0
100	131,8	130,1	130,1	170,1	150,6	181,4
200	267,2	260,9	261,6	357,7	304,7	377,9
300	407,1	393,6	395,4	559,7	463,0	587,0
400	551,4	528,7	532,1	772,6	626,8	824,6
500	669,3	666,6	672,0	925,1	786,2	1034,9
600	850,6	807,8	814,5	1225,6	969,5	1269,6
700	1004,7	951,9	960,3	1463,1	1149,7	1507,5
800	1160,6	1098,2	1108,2	1706,2	1335,3	1746,4
900	1319,0	1246,9	1258,7	1953,8	1527,2	1994,8
1000	1478,6	1398,2	1410,7	2205,2	1724,2	2237,4
1100	1639,5	1551,1	1564,9	2460,4	1926,5	2488,8
1200	1802,1	1705,3	1720,4	2718,5	2133,9	2735,2
1300	1965,1	1861,2	1877,5	2979,1	2345,5	2979,5
1400	2129,8	2010,0	2035,5	3241,4	2560,9	3238,0
1500	2295,7	2176,7	2194,7	3505,7	2781,3	3488,2
1600	2462,4	2335,5	2355,2	3771,4	3004,2	3747,5
1700	2630,5	2495,9	2515,7	4039,6	3231,7	4003,1
1800	2799,7	2656,4	2678,2	4307,3	3461,3	4261,2
1900	2969,4	2818,2	2840,4	4579,7	3693,5	4529,8
2000	3140,8	2979,9	3004,2	4847,8	3928,5	4667,6
2100	3311,7	3142,9	3167,6	5118,2	4166,1	5059,4
2200	3497,8	3306,3	—	3332,3	4405,8	5337,2
2300	3659,1	3469,3	3497,4	5660,7	4667,1	5608,7
2400	3834,3	3633,1	3663,3	5933,0	4890,9	5892,8
2500	4009,8	3797,4	3828,8	6209,6	5136,5	6169,8
2600	4184,9	3953,9	3988,4	6487,4	5387,1	6460,1
2700	4368,9	4135,9	4156,5	6761,8	5639,3	6753,8
2800	4546,1	4304,4	4320,7	7033,3	5897,8	7050,9
2900	4729,2	4469,0	4484,9	7311,1	6159,3	7351,3
3000	4914,9	4634,5	4652,1	7589,7	6425,8	7655,1

Таблица 22. Температура воспламенения, K , некоторых предельных углеводородов в зависимости от средней углеродной цепи

$l_{\text{ср}}$	$T_{\text{с}}$	$l_{\text{ср}}$	$T_{\text{с}}$	$l_{\text{ср}}$	$T_{\text{с}}$	$l_{\text{ср}}$	$T_{\text{с}}$
3	743	6	507	9	481	12	477
3,1	738	6,1	505	9,1	481	12,1	477
3,2	733	6,2	504	9,2	481	12,2	477
3,3	728	6,3	503	9,3	481	12,3	477
3,4	723	6,4	502	9,4	480	12,4	477
3,5	717	6,5	501	9,5	480	12,5	477
3,6	712	6,6	500	9,6	480	12,6	477
3,7	706	6,7	499	9,7	480	12,7	477
3,8	699	6,8	498	9,8	479	12,8	477
3,9	693	6,9	497	9,9	479	12,9	477
4	686	7	496	10	479	13	477
4,1	680	7,1	495	10,1	479	13,1	477
4,2	673	7,2	494	10,2	479	13,2	477
4,3	665	7,3	494	10,3	479	13,3	477
4,4	654	7,4	93	10,4	478	13,4	477
4,5	643	7,5	492	10,5	478	13,5	476
4,6	631	7,6	491	10,6	478	13,6	476
4,7	617	7,7	490	10,7	478	13,7	476
4,8	601	7,8	489	10,8	478	13,8	476
4,9	581	7,9	489	10,9	478	13,9	476
5	560	8	488	11	478	14	476
5,1	547	8,1	487	11,1	478	14,1	476
5,2	535	8,2	486	11,2	478	14,2	476
5,3	528	8,3	486	11,3	478	14,3	476
5,4	522	8,4	485	11,4	478	14,4	476
5,5	517	8,5	484	11,5	478	14,5	476
5,6	513	8,6	484	11,6	477	14,6	476
5,7	511	8,7	483	11,7	477	14,7	476
5,8	509	8,8	483	11,8	477	14,8	476
5,9	508	8,9	482	11,9	477	14,9	476

Таблица 23. Температура самовоспламенения, К, некоторых предельных одноатомных спиртов в зависимости от средней углеродной цепи

$l_{\text{ср}}$	$T_{\text{с}}$	$l_{\text{ср}}$	$T_{\text{с}}$	$l_{\text{ср}}$	$T_{\text{с}}$	$l_{\text{ср}}$	$T_{\text{с}}$
2,0	737	4,4	610	6,8	545	9,2	518
2,1	736	4,5	606	6,9	543	9,3	517
2,2	734	4,6	602	7,0	542	9,4	516
2,3	732	4,7	599	7,1	540	9,5	516
2,4	730	4,8	595	7,2	539	9,6	515
2,5	728	4,9	592	7,3	537	9,7	514
2,6	725	5,0	588	7,4	536	9,8	513
2,7	721	5,1	585	7,5	535	9,9	513
2,8	716	5,2	582	7,6	534	10,0	512
2,9	711	5,3	579	7,7	533	10,5	509
3,0	706	5,4	577	7,8	531	11,0	507
3,1	696	5,5	574	7,9	530	11,5	506
3,2	693	5,6	572	8,0	529	12,0	505
3,3	686	5,7	569	8,1	528	12,5	505
3,4	678	5,8	567	8,2	527	13,0	504
3,5	669	5,9	564	8,3	526	13,5	504
3,6	658	6,0	562	8,4	525	14,0	503
3,7	649	6,1	560	8,5	524	14,5	503
3,8	642	6,2	557	8,6	523	15,0	502
3,9	634	6,3	555	8,7	522	15,5	502
4,0	628	6,4	553	8,8	521	16,0	501
4,1	623	6,5	551	8,9	520	16,5	501
4,2	619	6,6	549	9,0	519	17,0	500
4,3	614	6,7	547	9,1	519	17,5	500

Таблица 24. Температура самовоспламенения, К, некоторых ароматических углеводородов в зависимости от средней длины углеродной цепи

$l_{\text{ср}}$	$T_{\text{с}}$	$l_{\text{ср}}$	$T_{\text{с}}$	$l_{\text{ср}}$	$T_{\text{с}}$
-2	843	—	—	—	—
-1,9	842	0,1	810	2,1	702
-1,8	841	0,2	794	2,2	701
-1,7	840	0,3	774	2,3	701
-1,6	840	0,4	753	2,4	700
-1,5	839	0,5	733	2,5	700
-1,4	838	0,6	723	2,6	699
-1,3	837	0,7	71,8	2,7	699
-1,2	837	0,8	715	2,8	698
-1,1	836	0,9	713	2,9	698
-1	835	1	712	3	697
-0,9	835	1,1	711	3,1	697
-0,8	834	1,2	710	3,2	697
-0,7	833	1,3	709	3,3	697
-0,6	832	1,4	708	3,4	696
-0,5	831	1,5	707	3,5	696
-0,4	830	1,6	706	3,6	696
-0,3	829	1,7	705	3,7	696
-0,2	827	1,8	704	3,8	696
-0,1	824	1,9	703	3,9	696
0	819	2	703	4	695

Таблица 25. Значение параметров для расчета минимальной флегматизирующей концентрации инертных газов

Параметр	Значения параметров при разбавлении смеси		
	азотом	водяным паром	двуокисью углерода
h'_{f} , моль/кДж	$0,864 \cdot 10^{-5}$	$0,800 \cdot 10^{-5}$	$0,735 \cdot 10^{-5}$
$h'_{\text{Ф}}$	1,256	0,780	0,579
h'_{C}	2,5277	1,651	1,251

Параметр	Значения параметров при разбавлении смеси		
	азотом	водяным паром	диокси́дом углерода
h'_{H}	0,7592	0,527	0,418
h'_{O}	0,197	1,446	0,542
h'_{N}	-0,151	-0,147	-0,135
$h'_{\text{C}=\text{C}}$	1,500	1,500	1,500
$h'_{\text{Ф}}$	2,800	2,236	2,020
h'_{C}	5,946	5,000	4,642
h'_{H}	1,486	1,250	1,160
h'_{O}	-2,973	-2,500	-2,321
$h''_{\text{C}=\text{C}}$	0	0	0
h''_{N}	0	0	0

Таблица 26. Физико-химические константы горючих веществ

Наименование вещества	Состояние	Теплота образования (ΔH) из элементов, $\frac{\text{кДж}}{\text{моль}}$ при $T = 298 \text{ }^\circ\text{K}$	Теплота горения (ΔH_r), $\frac{\text{кДж}}{\text{моль}}$ при $T = 298 \text{ }^\circ\text{K}$	Теплоемкость (C_p) при постоянном давлении, $\frac{\text{Дж}}{(\text{моль} \cdot \text{K})}$	Теплота испарения ($\Delta H_{\text{исп}}$), $\frac{\text{кДж}}{\text{моль}}$
н-Амиловый спирт $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_4\text{OH}$	Г	-36,39	3377,70	—	46,05
Анилин $\text{C}_6\text{H}_5\text{NH}_2$	Ж	-29,70	3396,2	199,6	—
Антрацен ($\text{C}_{14}\text{H}_{10}$)	Тв	—	-7117,87	207,04	—
Ацетон (CH_3COCH_3)	Г	-210,96	—	75,3	32,29
Ацетон	Ж	-248,23	1789,77	124,73	—
Ацетальдегид (CH_3CHO)	Г	-106,36	1167,89	62,8	27,00
Ацетилен (C_2H_2)	Г	226,748	1299,618	43,928	48,14
Бензол (C_6H_6)	Г	+82,927	3301,51	81,67	78,284

Продолжение табл. 26

Наименование вещества	Состояние	Теплота образования (ΔH) из элементов, $\frac{\text{кДж}}{\text{моль}}$ при $T = 298 \text{ }^\circ\text{K}$	Теплота горения (ΔH_r), $\frac{\text{кДж}}{\text{моль}}$ при $T = 298 \text{ }^\circ\text{K}$	Теплоемкость (C_p) при постоянном давлении, $\frac{\text{Дж}}{(\text{моль} \cdot \text{K})}$	Теплота испарения ($\Delta H_{\text{исп}}$), $\frac{\text{кДж}}{\text{моль}}$
Бензол	Ж	+49,627	—	130,77	—
Бензофенон ($\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}$)	Тв	-32,91	7515,98	—	—
н-Бутан (C_4H_{10})	Г	126,15	2878,05	97,45	—
Нафталин (C_{10}H_8)	Тв	+75,44	5245,0	165,3	—
н-Гексан (C_6H_{14})	Г	-167,19	4197,7	143,09	28,88
н-Гексан	Ж	-198,82	—	194,93	—
Гептан (C_7H_{16})	Г	-187,82	—	165,98	—
Гептан	Ж	-224,39	4856,7	138,9	—
Глицерин $\text{C}_3\text{H}_5(\text{OH})_3$	Ж	-059,71	1661,84	223,11	76,05
Двуокись углерода (CO_2)	Г	-393,501	—	37,15	6,031
Дибензил ($\text{C}_{12}\text{H}_{14}$)	Тв	—	—	251,18	—
Диметиламин $(\text{CH}_3)_2\text{NH}$	Г	-24,6	—	69,37	—
Диоксан ($\text{C}_4\text{H}_8\text{O}_2$)	Ж	-397,81	—	152,7	31,77
Дифенил ($\text{C}_{12}\text{H}_{10}$)	Тв	-102,69	6272,66	197,17	48,02
1,1-Дихлорэтан $(\text{CHCl}_2-\text{CH}_3)$	Г	—	1118,08	76,27	30,56
1,2-Дихлорэтан $(\text{CH}_2\text{Cl}-\text{CH}_2\text{Cl})$	Г	—	1134,41	79,53	32,23
Диэтиловый эфир $(\text{C}_2\text{H}_5)_2\text{O}$	Ж	-273,2	2728,54	—	26,71
о-Ксилол $\text{C}_6\text{H}_4(\text{CH}_3)_2$	Г	+186,995	4590,37	133,26	—

Продолжение табл. 26

Наименование вещества	Состояние	Теплота образования (ΔH) из элементов, $\frac{\text{кДж}}{\text{моль}}$ при $T = 298 \text{ }^\circ\text{K}$	Теплота горения (ΔH_r), $\frac{\text{кДж}}{\text{моль}}$ при $T = 298 \text{ }^\circ\text{K}$	Теплоемкость (C_p) при постоянном давлении, $\frac{\text{Дж}}{(\text{моль} \cdot \text{K})}$	Теплота испарения ($\Delta H_{\text{исп}}$), $\frac{\text{кДж}}{\text{моль}}$
о-Ксилол	Ж	-24,439	—	187,9	36,71
м-Ксилол $\text{C}_6\text{H}_4(\text{CH}_3)_2$	Г	+17,238	4596,61	127,57	36,84
п-Ксилол	Ж	+25,418	—	183,3	—
п-Ксилол $\text{C}_6\text{H}_4(\text{CH}_3)_2$	Г	+17,948	4598,31	126,86	36,56
п-Ксилол	Ж	-24,429	—	183,7	—
Метан (CH_4)	Г	-74,847	890,34	35,715	—
Метилвый спирт (CH_3OH)	Г	-201,17	764,43	49,4	35,28
Метилвый спирт	Ж	-238,57	—	81,6	—
Муравьиная кислота (НСООН)	Г	-362,63	262,92	54,4	—
Муравьиная кислота	Ж	-409,20	—	—	—
Этилбензол ($\text{C}_6\text{H}_5-\text{C}_2\text{H}_5$)	Ж	—	—	—	36,31
Этиленгликоль $\text{C}_2\text{H}_4(\text{OH})_2$	Ж	—	—	—	56,93
н-Бутиловый спирт $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_3\text{OH}$	Г	282,132	2721,00	—	43,83
трет-Бутиловый спирт (CH_3) ₃ СОН	Ж	324,72 г	2634,25	—	—
Октан (C_8H_{18})	Г	-208,55	5515,7	188,87	34,62
Пентан (C_5H_{12})	Г	-166,44	5064,42	120,21	52,12
Пропан (C_3H_8)	Г	-103,847	22111,516	73,51	—
Этилен	Г	—	—	43,56	—

Продолжение табл. 26

Наименование вещества	Состояние	Теплота образования (ΔH) из элементов, $\frac{\text{кДж}}{\text{моль}}$ при $T = 298 \text{ }^\circ\text{K}$	Теплота горения (ΔH_f), $\frac{\text{кДж}}{\text{моль}}$ при $T = 298 \text{ }^\circ\text{K}$	Теплоемкость (C_p) при постоянном давлении, $\text{Дж}/(\text{моль} \cdot \text{K})$	Теплота испарения ($\Delta H_{\text{исп}}$), $\frac{\text{кДж}}{\text{моль}}$
Пропан	Ж	-125,185	2207,281	—	—
н-Пропиловый спирт $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_2\text{—OH}$	Ж	-306,98	2064,93	46	46,15
изо-Пропиловый спирт $(\text{CH}_3)_2\text{CH—OH}$	Г	-268,61	1987,41	—	40,19
изо-Пропиловый спирт	Ж	-320,29	—	—	—
Пропилбензол $(\text{C}_6\text{H}_5\text{—C}_3\text{H}_7)$	Ж	—	—	—	—
изо-Пропилбензол $(\text{C}_6\text{H}_5\text{CH}(\text{CH}_3)_2)$	Ж	—	—	—	37,92
Сахароза $(\text{C}_{12}\text{H}_{22}\text{O}_{11})$	Тв	-2222,09	5651,43	43,119	—
Толуол ($\text{C}_6\text{H}_5\text{CH}_3$)	Г	+49,999	3930,48	103,760	33,53
Толуол	Ж	+11,905	—	157,11	—
Тетрафенилметан $(\text{C}_{25}\text{H}_{20})$	Тв	—	12987,58	368,18	—
Уксусная кислота (CH_3COOH)	Г	-436,4	—	—	—
Уксусная кислота	Ж	-487,018	871,72	123,4	27,2
Фенонтрен ($\text{C}_{14}\text{H}_{10}$)	Тв	—	—	234,42	—
Хлорбензол $(\text{C}_6\text{H}_5\text{Cl})$	Ж	+116,3	7084,81	145,6	30,77
Циклогексан $(\text{C}_6\text{H}_{12})$	Ж	—	3954,89	106,27	30,73

Окончание табл. 26

Наименование вещества	Состояние	Теплота образования (ΔH) из элементов, $\frac{\text{кДж}}{\text{моль}}$ при $T = 298 \text{ }^\circ\text{K}$	Теплота горения (ΔH_f), $\frac{\text{кДж}}{\text{моль}}$ при $T = 298 \text{ }^\circ\text{K}$	Теплоемкость (C_p) при постоянном давлении, $\frac{\text{Дж}}{(\text{моль} \cdot \text{K})}$	Теплота испарения ($\Delta H_{\text{исп}}$), $\frac{\text{кДж}}{\text{моль}}$
Циклогексанол ($\text{C}_6\text{H}_{11}\text{OH}$)	Ж	—	3748,47	—	—
Этиловый спирт ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$) (этанол)	Г	-235,31	1410,03	71,1	38,59
Этиловый спирт	Ж	-277,63	—	111,46	10,52
Вода (H_2O)	Ж	-285,838	—	75,25	—
Вода	Г	—	—	33,56	—
Этан (C_2H_6)	Г	-84,667	1560,92	52,65	—
Этилацетат ($\text{CH}_3\text{COOC}_2\text{H}_5$)	Ж	-463,2	—	—	—
Сернистый ангидрид (SO_2)	Г	-296,9	—	—	—
Хлористый водород (HCl)	Г	-92,311	—	—	—
Цианистый водород (HCN)	Г	-130,5	—	—	—
Кислород	Г	—	—	29,37	—
Азот	Г	—	—	29,10	—
Водород	Г	—	-241,6	—	—

Таблица 27. Внутренние энергии газов (Дж)

Температура, К	H_2	O_2	N_2	CO	CO_2	H_2O
200	4039,5	4131,6	4152,5	4152,5	—	—
300	6027,8	60 220,4	60 233,0	6233,0	6948,8	7497,1
400	8104,1	8363,6	8317,6	8325,95	10 059,0	10 084,1
600	12 290,1	12 926,4	12 583,1	12 729,2	17 309,1	15 433,8

Окончание табл. 27

Температура, К	H ₂	O ₂	N ₂	CO	CO ₂	H ₂ O
800	16 523,7	17 853,3	17 070,5	17 204,5	25 563,9	213 235,6
1000	20 837,8	23 069	21 834,2	22 060,2	34 521,9	27 531,3
1200	25 300,2	28 473,2	26 832,3	27 146,2	43 965,6	34 325,2
1400	29 934,1	34 002,9	32 006,2	32 403,0	53 765,0	41 525,0
1600	34 710,0	39 666,5	37 305,6	37 778,7	63 819,8	49 143,6
1800	39 675,0	45 426,5	427,265	43 258,1	43 083,8	57 159,8
2000	44 790,2	51 270,1	48 256,2	48 829,7	84 502,8	65 510,9
2200	50 139,4	57 210,1	52 819,4	64 464,05	95 035,8	74 092,2
2400	55 397,6	63 250,5	59 441,2	60 131,9	105 088,1	82 882,8
2600	58 885,4	69 362,0	65 092,3	65 824,8	116 450,4	91 861,8
2800	66 477,9	74 553,1	70 865,5	71 563,9	127 300,5	100 967,3
3000	72 129,0	81 811,2	76 605,5	77 340,5	138 177,0	109 769,0
3200	77 853,5	88 228,4	82 316,7	—	149 025,0	118 850,7
3400	83 656,5	94 667,7	88 119,6	—	160 090,7	128 116,1
3600	89 522,2	101 178,2	99 939,2	—	171 198,3	137 483,6
3800	95 443,5	107 771,5	99 775,6	—	189 305,8	147 036,2
4000	101 416,9	114 362,4	105 620,4	—	193 476,2	159 213,7

Таблица 28. Зависимость скорости роста площади горения (м²/мин) от степени огнестойкости и типа объекта

Помещения	Степень огнестойкости				
	1	2	3	4	5
Производственные	0,3237	0,5298	0,9246	1,1356	2,1496
Складские	1,5395	2,1980	2,8313	3,0691	3,9016
Жилые	1,3427	1,8751	3,7243	3,5427	3,0152
Лечебные	0,4591	1,0626	1,3198	2,0163	3,1817
Административные	0,6210	1,7924	2,2913	3,7190	4,0712
Зрелищные	0,7161	1,8232	2,3215	3,1026	3,9753

Таблица 29. Параметры элементов пожарной нагрузки

Предметы, изделия	Размеры предметов и изделий, м	Масса изделий и предметов, кг	Коэффициент поверхности горения
Верстак столярный	1,5 × 0,8 × 0,1	54	4
Декорация из дерева	6 × 4 × 0,05	180	163,3
Диван	2 × 0,8 × 0,9	65	6,2
Журналы форматом 70 × 108 1/8 на стеллажах	1 × 0,2 × 0,27	23	2,6—4,3
Книги форматом 70 × 108 1/8 на стеллажах	1 × 0,18 × 0,26	30	2,7—4,4
Стеллаж для профилей и папок	0,43 × 1,5 × 1,34	31	6,9
Стеллаж для инструментов с полками и ящиками	0,1 × 0,45 × 2,0	75	16,6
Стеллаж многоярусный для книг и журналов	1 × 0,25 × 3,2	144	7,8
Стол двухтумбовый из фанеры	1,3 × 0,65 × 0,75	30	5,4
Стол двухтумбовый из досок	1 × 0,65 × 0,77	32	3,7
Стол канцелярский	1 × 0,65 × 0,75	18	4,1
Стул деревянный	0,4 × 0,4 × 0,82	4	2,2
Стул полумягкий деревянный	0,45 × 0,4 × 0,85	5	4,2
Шкаф книжный	1,1 × 0,35 × 1,5	23	7,4
Шкаф специальный для приборов	1,5 × 0,5 × 2,5	100	10,3
Шкаф платяной	1,2 × 0,45 × 1,25	45	8,1
Ящик тара деревянный	2,6 × 2 × 1,2	137	3,1
Ящик тара деревянный	2 × 1,4 × 1,2	124	3,9
Ящик тара деревянный	2,4 × 1,5 × 0,5	100	2,0
Ящик тара фанерный	0,39 × 0,27 × 0,21	1,5	3,6
Ящик тара картонный	Разных размеров	0,3—2,0	3,3—7

Содержание

Предисловие	3
Раздел 1. ГОРЕНИЕ	5
1.1. Условия для возникновения горения	5
1.1.1. Горючее вещество	6
1.1.2. Окислители	9
1.1.3. Источники воспламенения (зажигания)	10
1.2. Полное и неполное горение	11
1.2.1. Расход воздуха при горении	13
1.2.2. Объем продуктов сгорания	16
1.3. Виды и режимы горения	19
1.3.1. Распространение зоны химической реакции	19
1.3.2. Гомогенное и гетерогенное горение	19
1.3.3. Кинетические параметры процесса горения	21
1.3.4. Газодинамические параметры режима горения	22
1.4. Стадии процесса горения	24
1.5. Теплота горения	25
1.6. Температура горения	29
1.7. Воспламенение. Температура воспламенения	32
1.7.1. Методы определения температуры воспламенения ...	33
1.8. Самовоспламенение	35
1.8.1. Условия, влияющие на температуру самовоспламенения	36
1.8.2. Методы определения температуры самовоспламенения	39
1.9. Вспышка и воспламенения жидкостей	43
1.9.1. Методы расчета температуры вспышки	44

1.9.2. Методы расчета температуры воспламенения жидкостей	48
1.9.3. Методы определения температуры вспышки	49
1.10. Пределы воспламенения горючей смеси	52
1.10.1. Концентрационные пределы воспламенения газовых смесей	52
1.10.2. Температурные пределы воспламенения	58
1.10.3. Методы расчета температурных пределов воспламенения	58
1.10.4. Методы определения концентрационных и температурных пределов воспламенения	62
1.11. Методы определения горючести	69
1.12. Самовозгорание масел и жиров	74
1.12.1. Механизм самоокисления масел и жиров	75
1.12.2. Определение йодного числа	76
1.13. Горение твердых веществ и материалов	79
1.13.1. Температурные интервалы воспламенения и горения твердых веществ и материалов	80
1.14.2. Расчет величины пожарной нагрузки, коэффициента поверхности горения, скорости выгорания	83
Практические работы	90
<i>Практическая работа 1</i>	
Расчет расхода воздуха на горение	91
<i>Практическая работа 2</i>	
Расчет объема продуктов сгорания	101
<i>Практическая работа 3</i>	
Расчет теплоты горения	110
<i>Практическая работа 4</i>	
Расчет температуры горения	118
<i>Практическая работа 5</i>	
Расчет температуры самовоспламенения	128
<i>Практическая работа 6</i>	
Определение критических условий самовоспламенения горючих веществ	137

Практическая работа 7

Расчет температуры вспышки и воспламенения 150

Практическая работа 8

Расчет стехиометрической концентрации 160

Раздел 2. ВЗРЫВ 166

2.1. Разновидности взрывов 168

2.1.1. Химические взрывы 168

2.1.2. Физические взрывы 169

2.1.3. Комбинированные взрывы 172

2.1.4. Взрывы в средах 175

2.2. Случайные взрывы 177

2.2.1. Взрывы паров горючего и пыли в замкнутых
объемах 178

2.2.2. Взрывы сосудов с газом под давлением 180

2.2.3. Взрывы емкостей с перегретой жидкостью 182

2.2.4. Взрывы неограниченных облаков пара 183

2.2.5. Физические (паровые) взрывы 185

2.3. Характеристика ударных волн 187

2.3.1. Основные свойства и механизм образования
ударных волн 187

2.3.2. Параметры ударной волны 189

2.4. Параметры взрыва в замкнутом объеме 194

2.5. Тепловое действие взрыва 195

**Раздел 3. ПРОГНОЗНАЯ ОЦЕНКА ПОСЛЕДСТВИЙ
ВЗРЫВА** 2033.1. Методика расчета избыточного давления взрыва
горючих газов, паров ЛВЗ и ГЖ в производственном
помещении 2043.2. Методика расчета избыточного давления взрыва
горючей пыли в производственном помещении 2093.3. Методика расчета избыточного давления взрыва
горючих газов, паров ЛВЖ и ГЖ в открытом
пространстве 211

3.3.1. Расчет масс горючих веществ 212

3.3.2.	Расчет горизонтальных размеров зон горючей смеси при аварийных выбросах в открытое пространство	214
3.3.3.	Расчет избыточного давления и импульса волны давления	215
3.3.4.	Расчет критериев взрывопожарной опасности для горючей пыли	216
3.4.	Методика расчета интенсивности теплового излучения огненного шара	217
3.5.	Оценка ситуации при взрыве резервуара высокого давления с химически инертным газом	219
3.6.	Оценка степени разрушения объектов при взрыве	224
	Практические работы	226
	<i>Практическая работа 9</i>	
	Расчет температуры и давления взрыва в замкнутом объеме	226
	<i>Практическая работа 10</i>	
	Расчет температуры и давления взрыва для горючей смеси нестехиометрического состава	232
	<i>Практическая работа 11</i>	
	Расчет параметров волны давления при взрыве	238
	<i>Практическая работа 12</i>	
	Расчет параметров волны давления при сгорании паровоздушной смеси	242
	<i>Практическая работа 13</i>	
	Расчет интенсивности теплового излучения и времени существования огненного шара	245
	<i>Практическая работа 14</i>	
	Расчет параметров огненного шара, образующегося при взрыве резервуара на открытом пространстве	248
	<i>Практическая работа 15</i>	
	Расчет интенсивности теплового излучения при пожарах проливов ЛВЖ и ГЖ	254

<i>Практическая работа 16</i> Расчет размеров зоны, ограниченной нижним концентрационным пределом распространения пламени	259
<i>Практическая работа 17</i> Расчет избыточного давления взрыва в производственном помещении	264
Формулы, используемые при решении задач	270
Обозначения	280
Список используемой литературы	286
 Приложение I	
Переводная (в систему СИ) таблица некоторых единиц измерений	288
Соотношение между единицами измерения	289
Образование кратных и дольных единиц	295
Основные и производные тепловые единицы	301
 Приложение II. Основные физические постоянные	305
 Приложение III. Физико-химические константы горючих веществ	306

Девисилов Владимир Аркадьевич
Дроздова Татьяна Ивановна
Тимофеева Светлана Семеновна

Теория горения и взрыва

Практикум

Учебное издание

Редактор *Л.А. Шитова*
Корректор *Л.А. Милинская*
Компьютерная верстка *И.В. Кондратьевой*
Оформление серии *Л. Зарецкой*

Подписано в печать 12.07.2011. Формат 60 × 90/16.
Гарнитура «Таймс». Усл. печ. л. 22,0. Уч.-изд. л. 22,6.
Печать офсетная. Бумага офсетная. Тираж 1000 экз.
Заказ № 4951.

Издательство «ФОРУМ»
101990, Москва — Центр, Колпачный пер., д. 9а
Тел./факс: (495) 625-32-07, 625-52-43
E-mail: forum-knigi@mail.ru

Отдел продаж издательства «ФОРУМ»:

101990, Москва — Центр, Колпачный пер., д. 9а
Тел./факс: (495) 625-52-43
E-mail: forum-ir@mail.ru
www.forum-books.ru

*Книги издательства «ФОРУМ»
вы также можете приобрести:*

Отдел продаж «ИНФРА-М»
127282, Москва, ул. Полярная, д. 31в
Тел.: (495) 380-05-40 (доб. 252)
Факс: (495) 363-92-12

Отдел «Книга-почтой»
E-mail: podpiska@infra-m.ru;
books@infra-m.ru

Отпечатано с готовых диапозитивов в ОАО ордена «Знак Почета»
«Смоленская областная типография им. В. И. Смирнова».
214000, г. Смоленск, проспект им. Ю. Гагарина, 2.



ISBN 978-5-91134-555-6

