

**КОМИТЕТ ПО ЧРЕЗВЫЧАЙНЫМ СИТУАЦИЯМ
МВД РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН**

КОКШЕТАУСКИЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

**Кафедра общетехнических дисциплин, информационных систем и
технологий**

**Е.В. Тарахно, Д.Г. Трегубов, К.В. Жерноклев
Г.Ш. Хасанова, Д.Т. Казьяхметова**

**ТЕОРИЯ РАЗВИТИЯ И ПРЕКРАЩЕНИЯ ГОРЕНИЯ
ПРАКТИКУМ
ЧАСТЬ II**

Учебное пособие

Кокшетау – 2019

УДК 614.84 +519

ISBN 978-966-303-178-1

Теория развития и прекращения горения. Практикум. Часть II: Учебное пособие. — Кокшетау: КТИ КЧС МВД Республики Казахстан, 2019. — 126 с.

Составители: Е.В. Тарахно, Д.Г. Трегубов, К.В. Жерноклев, Г.Ш. Хасанова, Д.Т. Казьяхметова

Рецензенты:

Сергазина С.М. - заведующая кафедрой химии и биотехнологии Кокшетауского государственного университета имени Ш. Уалиханова, кандидат химических наук

Раимбеков К.Ж. - заместитель начальника по научной работе Кокшетауского технического института КЧС МВД Республики Казахстан, кандидат физико-математических наук, профессор, полковник гражданской защиты

В издании сжато изложены основные положения курса «Теоретические основы процессов горения и тушения пожаров». В учебном пособии представлены методические советы, алгоритмы и примеры решения типичных задач. Приведены условия задач для практических и контрольных работ, вопросы для самоконтроля и справочный материал. Рассмотрена общая характеристика, закономерности и параметры процессов возникновения горения. Издание предназначено для подготовки бакалавров по специальности «Пожарная безопасность».

Одобрено и рекомендовано к печати Учебно-методическим советом Кокшетауского технического института КЧС МВД Республики Казахстан.

Протокол №12 от «13» июня 2018 года.

© Кокшетауский технический институт
КЧС МВД Республики Казахстан, 2019

СОДЕРЖАНИЕ

	РАЗДЕЛ 2. ОБЩИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ И ПАРАМЕТРЫ ПРОЦЕССА ВОЗНИКНОВЕНИЯ ГОРЕНИЯ	5
1	Глава 1. Самовоспламенение горючих смесей	7
1.1	Температура самовоспламенения	7
1.2	Расчет температуры самовоспламенения	10
1.3	Методика расчета стандартной температуры самовоспламенения вещества по средней длине цепи	16
1.4	Примеры решения задач	16
1.5	Методика расчета стандартной температуры самовоспламенения смеси горючих веществ	22
1.6	Пример решения задачи	22
1.7	Методика расчета стандартной температуры самовоспламенения по константам гомологического ряда	24
1.8	Пример решения задачи	25
1.9	Задачи для самостоятельного решения	26
2	Глава 2. Самовозгорание веществ и материалов	31
2.1	Химическое самовозгорание	32
2.2	Методика расчетного определения склонности к самовозгоранию жиров и масел	37
2.3	Примеры решения задач	38
2.4	Методика определения возможности возникновения горения под влиянием экзотермического эффекта химической реакции	42
2.5	Примеры решения задач	45
2.6	Тепловое самовозгорание	49
2.7	Методика определения параметров теплового самовозгорания	53
2.8	Примеры решения задач	53
2.9	Задачи для самостоятельного решения	56
3	Глава 3. Вынужденное зажигание	63
3.1	Определение способности электрических разрядов к зажиганию	63
3.2	Методика расчета минимальной энергии зажигания	67
3.3	Примеры решения задач	67
3.4	Определение способности раскаленных тел к зажиганию	69
3.5	Методика определения способности электрических и фрикционных искр к зажиганию	76
3.6	Пример решения задачи	77
3.7	Определение возможности зажигания горючих веществ лучистым потоком тепла от пламени	78
3.8	Пример решения задачи	78
3.9	Методика определения способности к зажиганию тел, нагретых продуктами сгорания	79

3.10	Пример решения задачи	80
3.11	Определение возможности зажигания горючих веществ лучистым потоком тепла от пламени	81
3.12	Методика определения способности теплового потока пламени к зажиганию горючих веществ	85
3.13	Примеры решения задач	85
3.14	Задачи для самостоятельного решения	88
	ПРИЛОЖЕНИЕ	93
	ТЕРМИНЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ	120
	ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ	123
	ЛИТЕРАТУРА	124

РАЗДЕЛ 2. ОБЩИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ И ПА-РАМЕТРЫ ПРО-ЦЕССА ВОЗНИКНОВЕНИЯ ГОРЕНИЯ

Возникновение горения – это быстрый переход медленной окислительно-обновленной реакции к мгновенному преобразованию исходных веществ в продукты реакции за счет самоускорения. Это преобразование носит взрывной характер и сопровождается вспышкой или звуковым эффектом [1] – [3], [6].

Основная особенность явлений горения состоит в том, что скорость химической реакции увеличивается при уменьшении концентрации реагирующих веществ. Саморазгон реакции происходит вследствие изменения других параметров (свойств) системы, например, повышения температуры или накопления активных продуктов, которые ускоряют (катализируют) реакцию.

Существует обширный класс химических реакций, к которому относятся все реакции окисления углеводородов кислородом, скорость которых возрастает по мере накопления продуктов реакции [6]. Такие реакции называют *автокаталитическими*. Важной особенностью этих реакций является то, что автокатализ обусловлен в них не конечными продуктами реакции, а свободными радикалами, образующимися в результате промежуточных химических преобразований. Автокаталитические процессы этого типа относят к классу так называемых *цепных реакций*. При определенных условиях свободные радикалы или атомы могут стать автокаталитическими агентами реакции горения – *активными центрами*, которые вступают во взаимодействие между собой или с валентнонасыщенными молекулами. Скорость цепной реакции $\omega_{\text{цр}}$ отображается уравнением: $\omega_{\text{цр}} = \omega_o + \omega_f - \omega_g$,

где ω_o – скорость образования первичных активных центров;

ω_f – скорость реакции разветвления цепи, вследствие которой количество активных центров увеличивается;

ω_g – скорость реакции обрыва цепи, вследствие которой количество активных центров уменьшается.

При условии превышения скорости разветвления над скоростью обрыва цепи в системе общая скорость химической реакции окисления повышается, и, при достижении критического значения, окисление переходит в процесс горения, т.е. возникает загорание. Т.е., условия, необходимые для быстрого протекания реакции, созданы самой системой. При малом изменении внешних условий возможен переход от стационарного режима с малой скоростью реакции к режиму, когда ее скорость возрастает согласно экспоненциального закона. Явления резкого изменения режима протекания процесса при малом изменении внешних условий называются "критическими", а условия, при которых происходит этот переход, носят название "критических условий".

Таким образом, возникновение горения связано с накоплением в системе тепла или катализирующих активных продуктов реакции (активных центров). В первом случае говорят о *тепловом механизме возникновения горения*, а во втором – о *цепном*.

Необходимым условием возникновения горения является одновременное

наличие трех составляющих: горючего вещества и окислителя в достаточных концентрациях (т.е. горючей среды) и первичного импульса энергии достаточной мощности. Тепловым импульсом могут быть внешние факторы (раскаленная искра, электрический разряд, нагретые стенки сосуда, адиабатическое сжатие) или внутренние экзотермические процессы.

В зависимости от природы теплового импульса и начальных условий, в которых находится горючая система, различают три вида возникновения горения: самовоспламенение, самовозгорание, вынужденное зажигание.

При самовоспламенении вся горючая система нагревается извне до критической температуры, выше которой горючая система самостоятельно вспыхивает без дополнительного внешнего влияния.

При самовозгорании происходит накопление тепла в малой части горючей системы за счет протекания внутренних экзотермических физико-химических или биологических процессов, что приводит к возникновению горения.

При вынужденном зажигании горение возникает в любой точке холодной горючей системы вследствие действия высокотемпературного источника зажигания.

Если в результате любых процессов в системе повышается температура, то происходит повышение скорости движения молекул, увеличивается количество соударений, что ведет к активации компонентов горючей смеси. Молекулы начинают быстрее реагировать между собой с образованием конечных и промежуточных продуктов. Реакции окисления являются экзотермическими, т.е. идут с выделением тепла, поэтому, в системе происходит дополнительный разогрев и рост температуры. При наличии разности температур возникает процесс отдачи тепла от системы в окружающую среду по механизму конвекции.

Существует такая температура, при которой количество тепла, выделяющееся в ходе окисления, становится больше, чем количество тепла, отдаваемое от системы. При этом возникает саморазогрев системы, что приводит к возникновению горения.

Характеристики разных видов возникновения горения в значительной степени отличаются, но *общими чертами процесса возникновения горения* являются:

- образование горючей системы, состоящей из горючего вещества и окислителя, взятых в определенном соотношении;
- тепловыделение в горючей системе превышает теплоотдачу от системы в окружающее пространство, т.е. $q(+)$ > $q(-)$;
- повышается концентрация активных центров и температуры определенной части горючей системы до *критического значения*, выше которого скорость реакции окисления резко повышается;
- "переход от медленной реакции к мгновенной (горению) происходит за *время индукции*."

Глава 1. Самовоспламенение горючих смесей

1.1 Температура самовоспламенения

Самовоспламенение – это процесс возникновения горения в результате резкого повышения скорости экзотермических реакций окисления под действием внешнего нагрева всей горючей системы до критической температуры [1], [6], [10], [11].

Температура самовоспламенения – наименьшая температура горючей системы, при которой в условиях специальных испытаний наблюдается ее самовоспламенение.

При температуре самовоспламенения в горючей системе создаются условия, которые приводят к скачкообразному подъему температуры до температуры горения из-за резкого повышения скорости химической реакции без дополнительного внешнего влияния.

Температура самовоспламенения $T_{св}$ и время индукции $\tau_{инд}$ могут использоваться как показатель степени пожарной опасности горючих веществ и материалов. Чем ниже температура самовоспламенения вещества или меньше время индукции, тем легче возникнет горение, а значит, тем больше ее пожарная опасность.

Поскольку возникновение горения возможно вследствие разного изменения тепловыделения и теплоотдачи (увеличение интенсивности тепловыделения $q(+)\uparrow$ или уменьшение интенсивности теплоотдачи $q(-)\downarrow$, или одновременное их изменение), то температура самовоспламенения и величина индукционного периода не являются постоянными величинами, а зависят от характера изменения интенсивности тепловыделения и теплоотдачи.

На температуру самовоспламенения веществ, а значит и на пожарную опасность процесса, в котором используется это вещество и может образовываться горючая смесь, влияют три группы факторов:

1) вид горючего вещества (теплотворная способность: $Q_H\uparrow t_{св}\downarrow$, строение и пространственная структура вещества (средняя длина углеродной цепи): $l_{ср}\uparrow t_{св}\downarrow$);

2) состав горючей смеси (концентрация горючего вещества в смеси: при стехиометрическом соотношении компонентов $\varphi_{ГВ} = \varphi_{СТМ}$ температура самовоспламенения приобретает минимальное значение; концентрация кислорода в окислительной среде: $\varphi_{O_2}\uparrow t_{св}\downarrow$; наличие негорючих примесей в смеси: $\varphi_{нг}\uparrow t_{св}\uparrow$; наличие катализаторов или ингибиторов реакции окисления: $\varphi_{кат}\uparrow t_{св}\downarrow$, $\varphi_{инг}\uparrow t_{св}\uparrow$);

3) условия, в которых находится горючая смесь (давление в системе: $P\uparrow t_{св}\downarrow$; объем и диаметр сосуда: $V_{гс}\uparrow t_{св}\downarrow$, $d\uparrow t_{св}\downarrow$; площадь поверхности теплоотдачи: $S_{ТВ}\uparrow t_{св}\uparrow$; коэффициент конвекционной теплоотдачи: $\alpha_K\uparrow t_{св}\uparrow$; начальная температура смеси: $t_o\uparrow t_{св}\downarrow$).

Температура самовоспламенения углеводородов и их производных прежде всего определяется строением углеродной цепи молекулы, наличием ненасыщенных связей, а также типом функциональных групп, которые входят в угле-

родную цепь.

Наибольшую температуру самовоспламенения имеют ароматические углеводороды. Например, температура самовоспламенения бензола (ароматического углеводорода) равняется 864 К, циклогексана (циклического углеводорода) – 543 К; еще меньше температура самовоспламенения гексана (нормального алкана) – 534 К.

Соединения с ненасыщенными связями (алкени и алкины) окисляются легче, чем насыщенные углеводороды (алканы) с таким же количеством атомов углерода, поэтому и температура их самовоспламенения, как правило, ниже температуры самовоспламенения алканов.

Для углеводородов изомерного строения с увеличением степени разветвления молекулы температура самовоспламенения повышается. Например, температура самовоспламенения *n*-бутана 704 К, а изобутана – 749 К. Экспериментально установлено, что температура самовоспламенения зависит от средней длины углеродной цепи $l_{\text{ср}}$ алканов: чем длиннее углеродная цепь молекулы, тем меньше температура самовоспламенения. Это объясняется ослаблением связей между атомами углерода в более длинной молекуле.

Кислородосодержащие производные углеводородов (спирты, альдегиды, простые эфиры) имеют температуру самовоспламенения, как правило, ниже, чем у углеводородов с таким самым количеством атомов углерода в молекуле.

Скорость химической реакции максимальна при стехиометрическом соотношении горючего вещества и окислителя, поэтому при этой концентрации горючего вещества в смеси наблюдается минимальное значение температуры самовоспламенения. При контакте некоторых видов горючих веществ с чистым кислородом даже при температуре окружающей среды может возникнуть самовоспламенение. При отклонении концентрации горючего вещества от стехиометрической (как при нехватке, так и при избытке горючего), а также при добавлении к горючей смеси негорючих компонентов уменьшается скорость химической реакции, а значит, температура самовоспламенения повышается.

Поскольку реакции окисления углеводородов кислородом имеют цепной механизм, увеличение объема реакционного сосуда приводит к уменьшению скорости реакций обрыва цепей на стенках сосуда, а значит, и к росту общей скорости реакции окисления и увеличению интенсивности тепловыделения. При этом температура самовоспламенения снижается. С другой стороны, при уменьшении объема сосуда увеличивается удельная поверхность теплоотдачи ($S_{\text{то}}/V \sim 1/d$), а поэтому, температура самовоспламенения увеличивается. При условии уменьшения размера сосуда возможно достижение такого критического значения характерного размера сосуда $d_{\text{кр}}$, при котором самовоспламенение не происходит. Этот принцип используется в работе технологических аппаратов – *огнепреградителей*, представляющих собой газопроницаемые устройства, принцип действия которых заключается в разбивании горючей системы на маленькие объемы и резком увеличении площади теплоотдачи. Огнепреградители применяются в «дыхательных устройствах» технологического оборудования для предотвращения распространения пламени по горючим системам.

Поскольку прямое измерение температуры самовоспламенения связано со значительными трудностями, для практических целей в качестве температуры самовоспламенения принимают минимальную температуру стенки реакционного сосуда, при которой наблюдается самовоспламенение горючей смеси.

Экспериментально температуру самовоспламенения можно определить разными методами. Основные из них:

- 1) метод впуска готовой холодной горючей смеси в вакуумированный нагретый сосуд;
- 2) метод адиабатического сжатия готовой горючей смеси;
- 3) метод "капли", когда горючая смесь образуется в нагретом сосуде за счет испарения горючего вещества.

Поскольку температура самовоспламенения не является постоянной величиной и может изменяться при изменении условий проведения испытаний, то для того чтобы можно было сравнивать пожарную опасность нескольких веществ, необходимо сопоставлять их температуры самовоспламенения, определенные при одинаковых (стандартных) условиях. Для получения сравнимых и воспроизводимых результатов во время пожарно-технических исследований применяют стандартную испытательную установку СТС и методику, описанную в стандарте [30]. Прибор СТС предназначен для определения *стандартной температуры самовоспламенения*, газов, пара жидкостей и веществ, которые плавятся, методом "капли».

Стандартная температура самовоспламенения – наименьшая температура, определенная стандартным методом, до которой должна быть нагрета стехиометрическая горючая смесь пара с воздухом, чтобы возникло горение без внесения постороннего источника зажигания.

Стандартная температура самовоспламенения не является минимальной температурой, при которой происходит самовоспламенение горючей смеси. *Минимальная температура самовоспламенения* может быть меньше стандартной на $100 \div 150$ °С. Численные значения минимальной температуры самовоспламенения используют во время разработки пожарно-профилактических мероприятий, связанных с безопасным высокотемпературным нагревом веществ и материалов.

Температуру самовоспламенения веществ используют для:

- 1) сравнения пожароопасности веществ по температуре самовоспламенения (этот показатель обязателен для горючих веществ во всех агрегатных состояниях);
- 2) классификация пара легковоспламеняющихся жидкостей по группам взрывоопасных смесей с воздухом для выбора типа взрывозащищенного электрооборудования согласно [32].

Соответственно группе взрывоопасных смесей определяют максимально допустимую температуру нагрева поверхности электрического оборудования во взрывоопасных помещениях и во внешних установках, где возможен контакт этих поверхностей со взрывоопасной средой.

Таблица 1.1. Определение группы взрывоопасных смесей по их температуре самовоспламенения

Группа взрывоопасных смесей	Температура самовоспламенения, °С
T1	больше 450
T2	300–450
T3	200–300
T4	135–200
T5	100–135
T6	85–100

3) определения допустимой температуры нагрева рабочих поверхностей технологического оборудования.

Для определения безопасной температуры $t_{\text{без}}$ нагрева рабочих поверхностей технологического оборудования необходимо, чтобы было соблюдено требование стандарта [31] относительно предотвращения образования в горючей среде источников зажигания. Соответственно п. 2.3 стандарта, этого можно достичь поддержанием температуры нагрева поверхностей машин, механизмов, оборудования, устройств, веществ и материалов, которые могут вступить в контакт с горючей средой, ниже предельно допустимой, что составляет 80 % от минимальной температуры самовоспламенения горючего вещества. *Безопасную температуру* нагрева рабочих поверхностей технологического оборудования определяют по формуле:

$$t_{\text{без}} \leq 0,8 \cdot t_{\text{св}}, \text{ } ^\circ\text{C} \quad (1.1)$$

Температуру самовоспламенения твердых веществ нельзя использовать для определения допустимых температур безопасного нагрева технологического оборудования. В этом случае следует рассматривать условия возникновения теплового самовозгорания и использовать другой параметр пожарной опасности веществ – температуру самонагрева (см. разд. 2, гл. 2; 2.6).

1.2 Расчет температуры самовоспламенения

Стандартную температуру самовоспламенения газов и паров органических соединений можно приблизительно рассчитать по формулам, предложенным в работе [5]:

$$t_{\text{св}} = 300 + 116\sqrt{5 - \ell_{\text{ср}}}, \text{ если } \ell_{\text{ср}} \leq 5; \quad (1.2)$$

$$t_{\text{св}} = 300 - 38\sqrt{\ell_{\text{ср}} - 5}, \text{ если } \ell_{\text{ср}} \geq 5, \quad (1.3)$$

где $\ell_{\text{ср}}$ – условная средняя длина цепи молекулы.

Погрешность расчета по формулам (1.2) и (1.3) для органических соединений,

состоящих из атомов С, Н, О и N, составляет 25 °С.

Условная средняя длина l_{cp} молекулы химического соединения равняется среднему арифметическому всех возможных длин l_i цепей молекулы:

$$l_{cp} = \frac{\sum l_i}{n_{ц}}, \quad (1.4)$$

где l_i – длина i -го цепи молекулы;
 $n_{ц}$ – количество цепей молекулы.

В данном случае под *цепью молекулы* понимают непрерывную цепь атомов, которая соединяет две концевые группы. Тогда количество цепей $n_{ц}$ молекулы равняется числу возможных соединений между парами концевых групп m в молекуле:

$$n_{ц} = 0,5 \cdot m(m - 1), \quad (1.5)$$

где m – количество концевых групп в молекуле.

Концевыми группами считают $-\text{CH}_3$, $=\text{CH}_2$, функциональные группы и циклы.

Если функциональная группа или цикл расположены в середине цепи, их следует считать одновременно и конечной, и промежуточной группой.

Длину l_i цепи молекулы рассчитывают как сумму числа атомов углерода в данной i -той цепи m_{C_i} и эквивалентных длин функциональных групп и циклов, которые входят в данную цепь, $l_{э}$:

$$l_i = m_{C_i} + \sum l_{э}.$$

Расчетное количество атомов углерода в алифатическом углеводороде равняется фактическому числу атомов углерода в данной цепи. Двойная связь $\text{C}=\text{C}$ длину цепи не изменяет. Тройная связь $\text{C}\equiv\text{C}$ увеличивает длину цепи, в котором он содержится, на $6/(m_{C_i}!)$ атомов углерода.

Длина цепи молекулы l_i возрастает на 2, если в ее состав входят две функциональные группы или цепи, присоединены к ароматическому циклу в *орто*-положении.

Эквивалентная длина функциональных групп $-\text{O}-\text{C}_6\text{H}_5$ и $-\text{COO}-$ равняется единице, групп $-\text{NH}-$ и $\text{N}\equiv$ равняется 2,5, а для $-\text{O}-$ в соединениях, где атом кислорода не соединен с первичным или вторичным атомом углерода, составляет 3,5. Если к молекуле присоединено несколько функциональных групп, длина каждой уменьшается в соответствующее количество раз.

Эквивалентную длину ароматического цикла определяют по формуле:

$$l_{эAr} = n_{я} - 0,5 + \sum l_{ef},$$

где $n_{я}$ – количество ядер в цикле;

$\sum l_{ef}$ – алгебраическая сумма эквивалентных длин функциональных групп, которые входят в состав цикла.

Эквивалентная длина неароматического моноядерного конденсированного цикла равняется числу атомов углерода в цикле, уменьшенное на 0,5.

Эквивалентная длина неароматического конденсированного цикла считается равной алгебраической сумме атомов углерода в ядре цикла, эквивалентных длин моноядерных неароматических циклов, ароматических циклов и функциональных групп, которые входят в состав данного ядра.

С большей точностью, чем по формулам (1.2) и (1.3), стандартную температуру самовоспламенения отдельных классов органических соединений можно определить по специальным таблицам: для парафиновых углеводородов – таблица 1.2, для насыщенных алифатических одноатомных спиртов – таблица 1.3, для ароматических углеводородов – таблица 1.4.

Среднюю длину молекулы рассчитывают по формуле (1.4). При этом расчетное количество атомов углерода в цепи алифатического спирта равняется фактическому числу атомов углерода плюс единица. Расчетное количество атомов углерода в цепи, в которой есть ароматическое кольцо, равняется фактическому числу атомов углерода минус единица. Атомы углерода в ароматическом кольце в расчет не берутся.

Температуру самовоспламенения отдельных классов органических соединений можно определить методом сравнительного расчета по эмпирической формуле (1.6):

$$t_{\text{св}} = at_{\text{св}}^{\text{алк}} + b, \quad (1.6)$$

где a, b – коэффициенты гомологического ряда данного вещества (см. табл. 2.5);

$t_{\text{св}}^{\text{алк}}$ – температура самовоспламенения алкана, которая соответствует условной средней длине цепи $\ell_{\text{ср}}$ алкильного радикала молекулы.

Если среднюю длину цепи молекулы можно рассчитать разными способами, то принимают среднее значение из всех рассчитанных способов.

Для определения температуры самовоспламенения *смеси горючих жидкостей*, можно использовать формулы (1.2), (1.3). Тогда среднюю длину цепи условной молекулы газовой смеси определяют с учетом мольных долей компонентов смеси.

Таблица 1.2. Зависимость температуры самовоспламенения парафиновых углеводородов (алканов) от длины углеродной цепи

l_{cp}	$t_{cb},$ °C	l_{cp}	$t_{cb},$ °C	l_{cp}	$t_{cb},$ °C	l_{cp}	$t_{cb},$ °C
3,0	470	6,1	232	9,2	208	12,3	204
3,1	465	6,2	231	9,3	208	12,4	204
3,2	460	6,3	230	9,4	207	12,5	204
3,3	455	6,4	229	9,5	207	12,6	204
3,4	450	6,5	228	9,6	207	12,7	204
3,5	444	6,6	227	9,7	207	12,8	204
3,6	439	6,7	226	9,8	206	12,9	204
3,7	433	6,8	225	9,9	206	13,0	204
3,8	426	6,9	224	10,0	206	13,1	204
3,9	420	7,0	223	10,1	206	13,2	204
4,0	413	7,1	222	10,2	206	13,3	204
4,1	407	7,2	221	10,3	206	13,4	204
4,2	400	7,3	221	10,4	205	13,5	203
4,3	392	7,4	220	10,5	205	13,6	203
4,4	381	7,5	219	10,6	205	13,7	203
4,5	370	7,6	218	10,7	205	13,8	203
4,6	358	7,7	217	10,8	205	13,9	203
4,7	344	7,8	216	10,9	205	14,0	203
4,8	328	7,9	216	11,0	205	14,1	203
4,9	308	8,0	215	11,1	205	14,2	203
5,0	287	8,1	214	11,2	205	14,3	203
5,1	274	8,2	213	11,3	205	14,4	203
5,2	262	8,3	213	11,4	205	14,5	203
5,3	255	8,4	212	11,5	205	14,6	203
5,4	249	8,5	211	11,6	204	14,7	203
5,5	244	8,6	211	11,7	204	14,8	203
5,6	240	8,7	210	11,8	204	14,9	203
5,7	238	8,8	210	11,9	204	15,0	202
5,8	236	8,9	209	12,0	204		
5,9	235	9,0	234	12,1	204		

Таблица 1.3. Зависимость температуры самовоспламенения одноатомных спиртов от эффективной длины углеродной цепи

l_{cp}	$t_{cb},$ °C	l_{cp}	$t_{cb},$ °C	l_{cp}	$t_{cb},$ °C	l_{cp}	$t_{cb},$ °C
2,0	464	4,4	337	6,8	272	9,2	245
2,1	463	4,5	333	6,9	270	9,3	244
2,2	461	4,6	326	7,0	269	9,4	243
2,3	459	4,7	326	7,1	267	9,5	243
2,4	457	4,8	322	7,2	266	9,6	241
2,5	455	4,9	319	7,3	264	9,7	241
2,6	452	5,0	315	7,4	263	9,8	240
2,7	448	5,1	312	7,5	262	9,9	240
2,8	443	5,2	309	7,6	261	10,0	239
2,9	438	5,3	306	7,7	260	10,5	236
3,0	433	5,4	304	7,8	258	11,0	234
3,1	423	5,5	301	7,9	257	11,5	233
3,2	420	5,6	299	8,0	256	12,0	232
3,3	413	5,7	296	8,1	255	12,5	232
3,4	405	5,8	294	8,2	254	13,0	231
3,5	396	5,9	291	8,3	253	13,5	231
3,6	385	6,0	289	8,4	252	14,0	230
3,7	376	6,1	287	8,5	251	14,5	230
3,8	369	6,2	284	8,6	250	15,0	229
3,9	361	6,3	282	8,7	249	15,5	229
4,0	355	6,4	280	8,8	248	16,0	228
4,1	350	6,5	278	8,9	247	16,5	228
4,2	346	6,6	276	9,0	246	17,0	227
4,3	341	6,7	274	9,1	246	17,5	227

Таблица 1.4. Зависимость температуры самовоспламенения ароматических соединений от эффективной длины углеродной цепи

l_{cp}	$t_{cb}, ^\circ C$						
-2,0	570	-0,4	557	1,2	437	2,8	425
-1,9	569	-0,3	556	1,3	436	2,9	425
-1,8	568	-0,2	554	1,4	435	3,0	424
-1,7	567	-0,1	551	1,5	434	3,1	424
-1,6	567	0,0	546	1,6	433	3,2	424
-1,5	566	0,1	537	1,7	432	3,3	424
-1,4	565	0,2	521	1,8	431	3,4	423
-1,3	564	0,3	501	1,9	430	3,5	423
-1,2	564	0,4	480	2,0	430	3,6	423
-1,1	563	0,5	460	2,1	429	3,7	423
-1,0	562	0,6	450	2,2	428	3,8	423
-0,9	562	0,7	445	2,3	428	3,9	423
-0,8	561	0,8	442	2,4	427	4,0	422
-0,7	560	0,9	440	2,5	427		
-0,6	559	1,0	439	2,6	426		
-0,5	558	1,1	438	2,7	426		

Таблица 1.5. Коэффициенты для определения температуры самовоспламенения отдельных классов органических соединений

Соединения	a	b	Погрешность расчета, $^\circ C$
спирты	0,6796	121,2	28
соединения с группой – NH ₂	0,4722	170,4	19,8
ароматические соединения	0,6412	252,9	15
карбоновые кислоты	0,7556	86,0	17
сложные эфиры:			
формиаты	0,7719	81,5	19,2
ацетаты	0,7909	52,0	15
пропионаты	0,7158	91,3	10

1.3 Методика расчета стандартной температуры самовоспламенения вещества по средней длине цепи

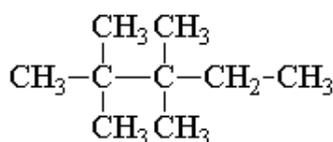
1. Составить структурную формулу вещества.
2. Пронумеровать звенья в структурной формуле.
3. Определить количество концевых групп m в молекуле.
4. Определить количество цепей $n_{ц}$ в молекуле горючего вещества по формуле (1.5).
5. Исходя из структурной формулы молекулы, определить длину каждой цепи ℓ_i .
6. Провести расчет условной средней длины цепи $\ell_{ср}$ молекулы по формуле (1.4).
7. Определить стандартную температуру самовоспламенения по формулам (1.2), (1.3) или по таблицам (табл. 1.2 – для алканов, табл. 1.3 – для спиртов, табл. 1.4 – для ароматических углеводородов).
8. Рассчитать максимальную безопасную температуру нагрева рабочих поверхностей по формуле (1.1).
9. Определить группу взрывоопасных смесей горючих веществ с воздухом по таблице 1.1.

1.4 Примеры решения задач

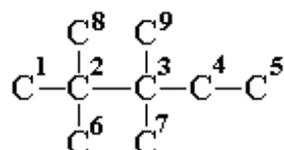
Задача.1. Рассчитать стандартную температуру самовоспламенения 2,2,3,3-тетраметилпентана, сравнить расчетное значение с экспериментальным, равным 430 °С. Определить безопасную температуру нагрева поверхностей и группу взрывоопасных смесей пара 2,2,3,3-тетраметил-пентана с воздухом.

Решение

1. Записываем структурную формулу 2,2,3,3-тетраметилпентана:



2. Нумеруем атомы углерода в цепях, не учитывая в этой записи атомы водорода:



3. Определяем количество концевых групп m в молекуле 2,2,3,3-тетраметилпентана. Концевыми группами в данном случае будут группы $\text{C}^1, \text{C}^5, \text{C}^6, \text{C}^7, \text{C}^8, \text{C}^9$. Таким образом, количество концевых групп $m = 6$.

4. Определяем количество цепей $n_{ц}$ в молекуле вещества по формуле (1.5):
 $n_{ц} = 0,5 \cdot 6 \cdot (6 - 1) = 15$.

5. Определяем длину каждой цепи ℓ_i . Для удобства составляем таблицу 1.6:

Таблица 1.6. Данные для задачи 1:

№ цепи	Состав цепи	Длина цепи
1	1-2-6	3
2	1-2-8	3
3	1-2-3-7	4
4	1-2-3-9	4
5	1-2-3-4-5	5
6	8-2-6	3
7	8-2-3-7	4
8	8-2-3-9	4
9	8-2-3-4-5	5
10	6-2-3-7	4
11	6-2-3-9	4
12	6-2-3-4-5	5
13	9-3-7	3
14	9-3-4-5	4
15	7-3-4-5	4

6. Рассчитываем условную среднюю длину $\ell_{\text{ср}}$ молекулы 2,2,3,3-тетраметилпентана по формуле (1.4):

$$\ell_{\text{ср}} = \frac{3 \cdot 4 + 4 \cdot 8 + 5 \cdot 3}{15} = 3,9.$$

7. Определяем стандартную температуру самовоспламенения:

а) по формуле (1.2), поскольку $\ell_{\text{ср}} \leq 5$:

$$t_{\text{св}} = 300 + 116\sqrt{5 - 3,9} = 419,9 \text{ } ^\circ\text{C};$$

б) по таблице 2.2 для парафиновых углеводородов: средней условной длине углеродной цепи $\ell_{\text{ср}} = 3,9$ соответствует температура самовоспламенения $t_{\text{св}} = 420 \text{ } ^\circ\text{C}$.

8. Рассчитываем максимальную безопасную температуру нагрева рабочих поверхностей по формуле (2.1):

$$t_{\text{без}} = 0,8 \cdot 419,9 = 335,9 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

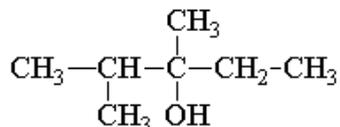
9. Определяем группу взрывоопасных смесей 2,2,3,3-тетраметилпентана по таблице 1.1: поскольку $t_{\text{св}} = 420 \text{ } ^\circ\text{C}$ находится в пределах от 300 до 450 $^\circ\text{C}$, то 2,2,3,3-тетраметилпентан относится к группе взрывоопасных смесей T2.

Вывод: расчетная стандартная температура самовоспламенения 2,2,3,3-тетраметилпентана равняется 420 $^\circ\text{C}$; отклонение расчета от экспериментального значения составляет 10 $^\circ\text{C}$ или 2,3 %. Температура нагрева поверхностей технологического оборудования не должна превышать 260 $^\circ\text{C}$. Паровоздушная смесь 2,2,3,3-тетраметилпентана относится к группе взрывоопасных смесей T2.

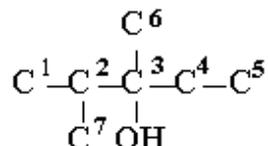
Задача 2. Рассчитать стандартную температуру самовоспламенения 2,3-диметилпентанола-3 и безопасную температуру нагрева поверхностей технологического оборудования, в котором используется данное вещество.

Решение

1. Составляем структурную формулу 2,3-диметил-пентанола-3:



2. Нумеруем атомы углерода в цепях, не записывая при этом атомы водорода углеродной цепи:



3. Определяем количество концевых групп m в молекуле 2,3-диметилпентанола-3. Конечными группами в данном случае будут группы C^1 , C^5 , C^6 , C^7 , OH . Таким образом, количество концевых групп $m = 5$.

4. Определяем количество цепей $n_{\text{ц}}$ в молекуле вещества по формуле (2.5):

$$n_{\text{ц}} = 0,5m(m - 1) = 0,5 \cdot 5 \cdot (5 - 1) = 10.$$

5. Определяем длину каждой цепи ℓ_i , учитывая, что расчетное количество атомов углерода в цепи алифатического спирта равняется фактическому числу атомов углерода плюс единица (табл. 1.7).

Таблица 1.7. Длина цепи ℓ_i

№ цепи	Состав цепи	Длина цепи
1	1 – 2 – 7	3
2	1 – 2 – 3 – 6	4
3	1 – 2 – 3 – OH	4
4	1 – 2 – 3 – 4 – 5	5
5	7 – 2 – 3 – OH	4
6	7 – 2 – 3 – 6	4
7	7 – 2 – 3 – 4 – 5	5
8	6 – 3 – 4 – 5	4
9	6 – 3 – OH	3
10	OH – 3 – 4 – 5	4

6. Рассчитываем условную среднюю длину $\ell_{\text{ср}}$ молекулы 2,3-диметилпентанола-3:

$$\ell_{\text{ср}} = \frac{3 \cdot 2 + 4 \cdot 6 + 5 \cdot 2}{10} = 4,0.$$

7. Определяем температуру самовоспламенения по таблице 2.3.

Поскольку условная средняя длина углеродной цепи 2,3-диметилпентанола-3 составляет $\ell_{\text{ср}} = 4$, температура самовоспламенения

равняется $t_{св} = 355 \text{ }^\circ\text{C}$.

8. Рассчитываем максимальную безопасную температуру нагрева рабочих поверхностей:

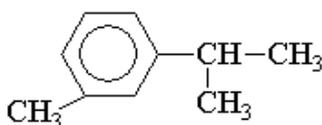
$$t_{бсз} = 0,8 \cdot 355 = 284 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Вывод: расчетная стандартная температура самовоспламенения 2,3-диметилпентанола-3 равняется $355 \text{ }^\circ\text{C}$; безопасная температура нагрева поверхностей технологического оборудования не должна превышать $284 \text{ }^\circ\text{C}$.

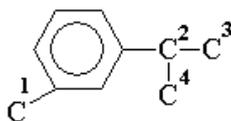
Задача 3. Рассчитать стандартную температуру самовоспламенения 3-метилизопропилбензола.

Решение

1. 3-метилизопропилбензол принадлежит к ароматическим соединениям; составляем структурную формулу молекулы:



2. Нумеруем атомы углерода в цепях, не учитывая при этом атомы водорода:



3. Определяем количество конечных групп m в молекуле 3-метилизопропилбензола. Концевыми группами в данном случае будут три метильные группы C^1 , C^3 , C^4 и ароматическое кольцо Ar (как было отмечено раньше, цикл, расположенный в середине цепи, считают одновременно и концевой, и промежуточной группой). Таким образом, количество концевых групп $m = 4$.

4. Определяем количество цепей $n_{ц}$ в молекуле вещества по формуле (1.5):

$$n_{ц} = 0,5 \cdot 4 \cdot (4 - 1) = 6.$$

5. Определяем длину цепей l_i , учитывая, что расчетное количество атомов углерода в цепи, в которой есть ароматическое кольцо, равняется фактическому числу атомов углерода минус единица (табл. 1.8). Атомы углерода в ароматическом кольце в расчет не берут.

Таблица 1.8. Длина цепи ℓ_i :

№ цепи	Состав цепи	Длина цепи
1	1 – Ar	0
2	1 – Ar – 2 – 4	2
3	1 – Ar – 2 – 3	2
4	Ar – 2 – 3	1
5	Ar – 2 – 4	1
6	4 – 2 – 3	3

6. Рассчитываем условную среднюю длину цепи $\ell_{\text{ср}}$:

$$\ell_{\text{ср}} = \frac{2+2+1+1+3}{6} = 1,5.$$

7. По таблице 1.4 определяем температуру самовоспламенения 3-метилизопропилбензола: поскольку условная средняя длина углеродной цепи составила $\ell_{\text{ср}} = 1,5$, температура самовоспламенения равняется $t_{\text{св}} = 434$ °С.

Задача 4. Определить безопасную максимальную температуру нагрева рабочей поверхности радиационной сушилки красильного цеха, если растворителем является 2,4-диметил-3-пентанол.

Решение

Температура самовоспламенения 2,4-диметил-3-пентанола по справочнику [7] равняется 325 °С. Определяем безопасную максимальную температуру нагрева рабочей поверхности радиационной сушилки по формуле (1.1):

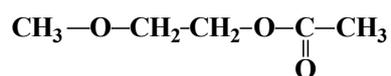
$$t_{\text{без}} = 0,8 \cdot 325 = 260^\circ\text{С}.$$

Вывод: температура нагрева поверхностей радиационной сушилки красильного цеха в случае использования в качестве растворителя 2,4-диметил-3-пентанола не должна превышать 260 °С.

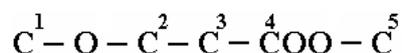
Задача 5. Рассчитать стандартную температуру самовоспламенения метоксиэтилацетата и безопасную температуру нагрева поверхностей технологического оборудования. Сравнить рассчитанное значение с экспериментально определенной температурой самовоспламенения, которая равняется 400 °С.

Решение

1. Составляем структурную формулу метоксиэтилацетата:



2. Нумеруем атомы углерода в цепях, не записывая при этом атомы водорода углеродной цепи:



3. Определяем количество концевых групп в молекуле метоксиэтилацетата.

Как было отмечено раньше, функциональные группы, расположенные внутри цепи, считают одновременно и концевыми, и промежуточными. Поэтому, в данном случае, концевыми будут группы C^1 , $-O-$, $-C^4OO-$, C^5 , т.е., количество концевых групп $m = 4$.

4. Определяем количество цепей $n_{ц}$ в молекуле вещества:

$$n_{ц} = 0,5m(m - 1) = 0,5 \cdot 4 \cdot (4 - 1) = 6$$

5. Определяем длину каждой цепи l_i , учитывая количество атомов углерода и эквивалентную длину функциональных групп (табл. 1.9). Поскольку в состав метоксиэтилацетата входят две функциональные группы, расчетная длина каждой уменьшается в два раза. Поэтому длина группы $-O-$ принимается равной 1,75, а группы $-COO-$ принимается равной 0,5.

Таблица 1.9 Длина цепи l_i :

№ цепи	Состав цепи	Длина цепи
1	1 – 2	2,75
2	1 – 2 – 3 – 4 – 5 – 6	6,25
3	1 – 2 – 3 – 4 – 5	5,25
4	2 – 3 – 4 – 5 – 6	5,25
5	2 – 3 – 4 – 5	4,25
6	5 – 6	1,5

6. Рассчитываем условную среднюю длину $l_{ср}$ молекулы метоксиэтилацетата:

$$l_{ср} = \frac{2,75 + 6,25 + 5,25 \cdot 2 + 4,25 + 1,5}{6} = 4,2.$$

7. Поскольку $l_{ср} \leq 5$, определяем температуру самовоспламенения метоксиэтилацетата по формуле (1.2):

$$t_{св} = 300 + 116\sqrt{5 - 4,2} = 403 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

8. Рассчитываем максимальную безопасную температуру нагрева рабочих поверхностей:

$$t_{без} = 0,8 \cdot 403 = 322,5 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Вывод: расчетная стандартная температура самовоспламенения метоксиэтилацетата равняется $403 \text{ } ^\circ\text{C}$; отклонение расчета от экспериментального значения составляет $3 \text{ } ^\circ\text{C}$ или $0,8 \%$. Температура нагрева поверхностей технологического оборудования, которые контактируют с паром метоксиэтилацетата, не должна превышать $322,5 \text{ } ^\circ\text{C}$.

1.5 Методика расчета стандартной температуры самовоспламенения смеси горючих веществ

1. Определить состав горючей смеси и установить молярные доли каждого компонента смеси по формуле:

$$r_{\mu_i} = \frac{\frac{c_i}{\mu_i}}{\sum_{i=1}^k \frac{c_i}{\mu_i}},$$

где c_i – массовая концентрация i -го компонента в составе горючей смеси, %;

μ_i – молярная масса i -го компонента горючей смеси, г·моль⁻¹;

k – количество компонентов горючего смеси.

2. Составить структурную формулу каждого компонента горючей смеси и рассчитать среднюю длину их цепи $\ell_{\text{ср}_i}$ по формуле (1.4).

3. Рассчитать среднюю длину условной молекулы газовой смеси $\ell_{\text{ср}_{\text{см}}}$ по формуле:

$$\ell_{\text{ср}_{\text{см}}} = \sum_{i=1}^k r_{\mu_i} \ell_{\text{ср}_i}.$$

4. Определить стандартную температуру самовоспламенения горючей смеси по формулам (1.2) или (1.3) в зависимости от средней длины цепи.

5. Рассчитать максимальную безопасную температуру нагрева рабочих поверхностей по формуле (1.1).

1.6 Пример решения задачи

Задача. Рассчитать стандартную температуру самовоспламенения растворителя РС-1 и безопасную максимальную температуру нагрева поверхностей технологического оборудования. Сравнить рассчитанное значение с экспериментально определенной температурой самовоспламенения, равной 490 °С.

Решение

1. Определяем состав растворителя РС-1 и молярные массы компонентов смеси по справочнику [7]:

№	компонент смеси	формула	c_i , мас. %	μ_i , г·моль ⁻¹
1	бутилацетат	$C_6H_{12}O_2$	30	116
2	толуол	C_7H_8	60	92
3	ксилол	C_8H_{10}	10	106

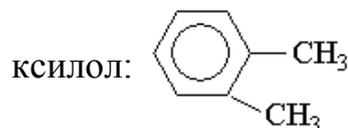
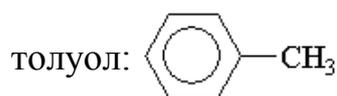
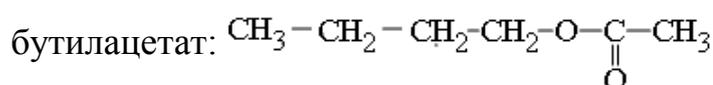
Рассчитываем мольные доли компонентов растворителя РС–1:

$$r_{\mu 1} = \frac{\frac{30}{116}}{\frac{30}{116} + \frac{60}{92} + \frac{10}{106}} = 0,26; \quad r_{\mu 2} = \frac{\frac{60}{92}}{\frac{30}{116} + \frac{60}{92} + \frac{10}{106}} = 0,65;$$

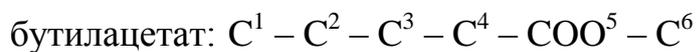
$$r_{\mu 3} = \frac{\frac{10}{106}}{\frac{30}{116} + \frac{60}{92} + \frac{10}{106}} = 0,09.$$

2. Определяем среднюю длину цепи ℓ_{cp_i} каждого компонента растворителя РС–1.

2.1. Составляем структурные формулы компонентов смеси:



2.2. Определяем количество цепей и их длину для каждого компонента растворителя РС–1. Нумеруем атомы углерода и функциональные группы, входящие в состав молекулы:



У бутилацетата 3 концевые группы с учетом группы $-\text{COO}-$, длина которой принимается за 1: C^1 , COO^5 , C^6 . Поэтому, по формуле (1.5) количество цепей в его молекуле – 3.

№ цепи бутилацетата	Состав цепи	Длина цепи ℓ_i
1	1 – 2 – 3 – 4 – 5 – 6	6
2	1 – 2 – 3 – 4 – 5	5
3	5 – 6	2

Толуол и ксилол имеют ароматическое кольцо, которое считается одновременно и конечной, и промежуточной группой и уменьшает длину углеродной цепи на 1.

У толуола 2 концевые группы: C^1 , Ar , количество цепей - 1.

№ цепи толуола	Состав цепи	Длина цепи ℓ_i
1	Ar – 1	0

У ксилола 3 концевые группы: C^1 , Ar, C^2 , количество цепей – 3. Кроме того, ксилол имеет углеродную цепь в *орто*-положении, поэтому расчетная длина цепи увеличивается на 2.

№ цепи ксилола	Состав цепи	Длина цепи ℓ_i
1	1 – Ar	0
2	1 – Ar – 2	4
3	Ar – 2	0

2.3. Рассчитываем условную среднюю длину компонентов растворителя РС–1:

$$\ell_{\text{cp1}} = \frac{6+5+2}{3} = 4,33; \quad \ell_{\text{cp2}} = 0; \quad \ell_{\text{cp3}} = \frac{0+4+0}{3} = 1,33.$$

3. Определяем среднюю длину условной молекулы растворителя РС–1:

$$\ell_{\text{cp}} = 0,26 \cdot 4,33 + 0,65 \cdot 0 + 0,09 \cdot 1,33 = 1,2.$$

4. Поскольку $\ell_{\text{cp}} \leq 5$, определяем температуру самовоспламенения растворителя РС–1 по формуле (1.2):

$$t_{\text{св}} = 300 + 116\sqrt{5 - \ell_{\text{cp}}} = 300 + 116\sqrt{5 - 1,2} = 526 \text{ }^\circ\text{C}.$$

5. Рассчитываем максимальную безопасную температуру нагрева рабочих поверхностей:

$$t_{\text{без}} = 0,8 \cdot 526 = 420,8 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Вывод: расчетная стандартная температура самовоспламенения растворителя РС-1 равняется 526 °С; отклонение расчета от экспериментального значения составляет 36 °С или 7,3 %. Температура нагрева поверхностей технологического оборудования не должна превышать 420,8 °С.

1.7 Методика расчета стандартной температуры самовоспламенения по константам гомологического ряда

1. Записать структурную формулу вещества и определить гомологический класс данного химического соединения.

2. Рассчитать температуру самовоспламенения углеводородного радикала, который входит в состав молекулы.

Например: пропилацетат $C_5H_{10}O_2$ (пропиловый эфир уксусной кислоты) относится к сложным эфирам – *ацетатам*, а углеводородным радикалом для него будет *пропан*.

3. Определить коэффициенты a и b уравнения (1.6) по таблице 1.5.

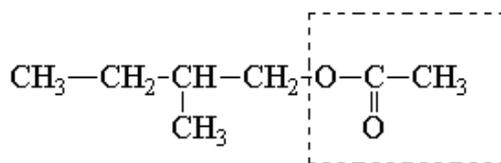
4. Рассчитать температуру самовоспламенения химического соединения по уравнению (1.6).

1.8 Пример решения задачи

Задача. Рассчитать стандартную температуру самовоспламенения 2-метилбутилацетата и безопасную температуру нагрева поверхностей технологического оборудования. Сравнить рассчитанное значение с экспериментально определенной температурой самовоспламенения, которая равняется $390\text{ }^\circ\text{C}$.

Решение

1. 2-метилбутилацетат относится к сложным эфирам уксусной кислоты; тогда его структурная формула:

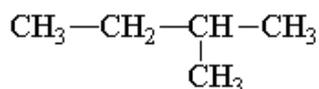


Алкильный радикал

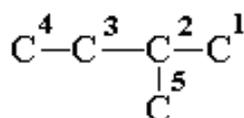
Функциональная группа

2. Проводим расчет температуры самовоспламенения углеводородного радикала.

2.1. Углеводородным радикалом будет 2-метилбутан со структурной формулой:



2.2. Нумеруем атомы углерода в цепях:



2.3. Определяем количество концевых групп m в молекуле 2-метилбутана. Конечными группами будут группы C^1 , C^4 , C^5 . Таким образом, количество концевых групп $m = 3$.

2.4. Определяем количество цепей $n_{\text{ц}}$ в молекуле радикала:

$$n_{\text{ц}} = 0,5 \cdot 3 \cdot (3 - 1) = 3.$$

2.5. Определяем длину каждой цепи ℓ_i (табл. 1.10):

Таблица 1.10. Длина цепи ℓ_i :

№ цепи	Состав цепи	Длина цепи
1	1-2-3-4	4
2	1-2-3-5	4
3	5-3-4	3

2.6. Рассчитываем условную среднюю длину ℓ_{cp} радикала:

$$\ell_{cp} = \frac{4 \cdot 2 + 3}{3} = 3,7.$$

2.7. Рассчитываем температуру самовоспламенения алкильного радикала по формуле (1.2), поскольку $\ell_{cp} < 5$:

$$t_{cb} = 300 + 116\sqrt{5 - 3,7} = 432 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

3. Определяем константы a и b из таблицы 1.5 для гомологического ряда ацетатов: $a = 0,7909$, $b = 52,0$.

4. Рассчитываем температуру самовоспламенения 2-метилбутилацетата по формуле (1.6):

$$t_{cb} = at_{cb}^{алк} + b = 0,7909 \cdot 432 + 52,0 = 393,8 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

5. Рассчитываем максимальную безопасную температуру нагрева рабочих поверхностей по формуле (1.2):

$$t_{раб\ без} \leq 0,8 \cdot 393,8 = 315 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Вывод: расчетное значение стандартной температуры самовоспламенения 2-метилбутилацетата составляет $393,8 \text{ } ^\circ\text{C}$, что отличается от экспериментально определенной температуры самовоспламенения на $3,8 \text{ } ^\circ\text{C}$, т.е. погрешность расчета представляет меньше 1%. Температура нагрева поверхностей технологического оборудования, в котором используется это вещество, не должна превышать $315 \text{ } ^\circ\text{C}$.

1.9 Задачи для самостоятельного решения

Задача 1. Для приведенных в таблице 1.11 веществ рассчитать:

- стандартную температуру самовоспламенения t_{cb} по средней длине цепи;
- группу взрывоопасных смесей и безопасную температуру нагрева рабочей поверхности оборудования $t_{p.без}$.

Таблица 1.11. Данные для задачи 1:

№	Название вещества	Химическая формула
1.	2,2-диметилпропан	C_5H_{12}
2.	2-метилбутан	C_5H_{12}
3.	2,2,4-триметилпентан	C_8H_{18}
4.	2,2,3,6-тетраметилгептан	$C_{11}H_{24}$
5.	2,5-диметил-5-этил-3-пропилгептан	$C_{14}H_{30}$
6.	2-метилпропен-1	C_4H_8
7.	2,4,4,-триметилпентен-1	C_8H_{16}
8.	бутанол	$C_4H_{10}O$
9.	гексанол	$C_6H_{14}O$
10.	2-метилбутанол-3	$C_5H_{12}O$
11.	2-аминобутан	$C_4H_{11}N$
12.	этилбензол	C_8H_{10}
13.	изопропилбензол	C_9H_{12}
14.	<i>n</i> -диэтилбензол	$C_{10}H_{14}$
15.	<i>m</i> -ксилол	C_8H_{10}
16.	циклогексан	C_6H_{12}
17.	этилциклогексан	C_8H_{16}
18.	изоамилциклогексан	$C_{11}H_{22}$
19.	1,1-дифенилбутан	$C_{16}H_{18}$
20.	2-этилгексанол	$C_8H_{18}O$

Задача 2. Не проводя расчетов, исходя из особенностей строения молекул, разместить в ряд по степени увеличения склонности к самовоспламенению следующие вещества:

- а) циклогексан, гексан, бензол;
- б) пропен, пропан, метилацетилен;
- в) пентан, циклопентан, изопентан;
- г) этан, ацетилен, этилен;
- д) бутан, этан, гексан, пропан;
- е) циклогептан, 2,2,3-триметилбутан, гептан.

Задача 3. Для приведенных в таблице 1.12 веществ рассчитать стандартную t_{cv} по константами гомологического ряда.

Таблица 1.12. Данные для задачи 3:

№	Название вещества	Химическая формула
1.	амилформиат	$C_6H_{12}O_2$
2.	бутилформиат	$C_5H_{10}O_2$
3.	пропилформиат	$C_4H_8O_2$
4.	бутилпропионат	$C_7H_{14}O_2$
5.	этилпропионат	$C_5H_{10}O_2$
6.	метилпропионат	$C_4H_8O_2$
7.	метилацетат	$C_3H_6O_2$
8.	этилацетат	$C_4H_8O_2$
9.	2-этилбутилацетат	$C_8H_{16}O_2$
10.	додекановая кислота	$C_{12}H_{24}O_2$
11.	диметилпропионовая кислота	$C_5H_{10}O_2$
12.	гексановая кислота	$C_6H_{12}O_2$
13.	изооктановая кислота	$C_8H_{16}O_2$
14.	бензилбензоат	$C_{14}H_{12}O_2$
15.	метилбензоат	$C_8H_8O_2$
16.	этилбензоат	$C_9H_{10}O_2$
17.	лауриновый спирт	$C_{12}H_{26}O$
18.	гексанол-3	$C_6H_{14}O$
19.	бутанол-2	$C_4H_{10}O$
20.	2-метилбутанол-3	$C_5H_{12}O$
21.	этиламин	C_2H_7N
22.	2-аминобутан	$C_4H_{11}N$
23.	диэтилэтаноламин	$C_6H_{15}ON$
24.	изобутиламин	$C_4H_{11}N$
25.	2-этилгексиламин	$C_8H_{19}N$

Задача 4. Для приведенных в таблице 1.13 веществ определить:

а) наибольшую безопасную температуру рабочих поверхностей технологического оборудования, если в технологическом процессе используют указанные жидкости;

б) возможность использования в технологическом процессе указанных жидкостей, если технологическое оборудование имеет заданную температуру поверхности.

Таблица 1.13. Данные для задачи 4:

№	Название вещества	Хим. формула	Темп. пов-сти, °С
1.	2,2-диметилпропан	C_5H_{12}	150
2.	2-метилбутан	C_5H_{12}	175
3.	2,2,4,-триметилпентан	C_8H_{18}	200
4.	2,2,3,6-тетраметилгептан	$C_{11}H_{24}$	225
5.	2-метилпропен-1	C_4H_8	250
6.	2,4,4,-триметилпентен-1	C_8H_{16}	275
7.	2,4-диметил-3-этилпентан	C_9H_{20}	300
8.	2,4-диметил-3-пентанол	$C_7H_{16}O$	325
9.	дитолилметан	$C_{15}H_{16}$	350
10.	1,3-дифенилбензол	$C_{18}H_{14}$	375
11.	1,1-дифенилбутан	$C_{16}H_{18}$	400
12.	3,3-дифенилбутен-1	$C_{16}H_{16}$	425
13.	о-диэтилбензол	$C_{10}H_{14}$	450
14.	2-метилпропанол-1	$C_4H_{10}O$	475
15.	изобутилбензол	$C_{10}H_{14}$	500
16.	2-метилпентан	C_6H_{14}	525
17.	2,2,3,3-тетраметилпентан	C_9H_{20}	550
18.	2,2,3,4-тетраметилпентан	C_9H_{20}	150
19.	3-метилоктан	C_9H_{20}	175
20.	4,4-диметилгептан	C_9H_{20}	200
21.	2-метилнонан	$C_{10}H_{22}$	225
22.	бутанол	$C_4H_{10}O$	250
23.	гексанол	$C_6H_{14}O$	275
24.	2-метилбутанол-3	$C_5H_{12}O$	300
25.	пропилформиат	$C_4H_8O_2$	325
26.	амилформиат	$C_6H_{12}O_2$	350
27.	бутилпропионат	$C_7H_{14}O_2$	375
28.	гексановая кислота	$C_6H_{12}O_2$	400
29.	2-аминобутан	$C_4H_{11}N$	425
30.	этилбензол	C_8H_{10}	450
31.	изопропилбензол	C_9H_{12}	475
32.	п-диэтилбензол	$C_{10}H_{14}$	500
33.	бензилбензоат	$C_{14}H_{12}O_2$	525
34.	п-ксилол	C_8H_{10}	550
35.	о-ксилол	C_8H_{10}	225
36.	циклогексан	C_6H_{12}	250
37.	этилциклогексан	C_8H_{16}	275
38.	изобутилциклогексан	$C_{10}H_{20}$	300
39.	изоамилциклогексан	$C_{11}H_{22}$	325
40.	этилбензоат	$C_9H_{10}O_2$	350

Задачи 5. Рассчитать безопасную температуру нагрева рабочей поверхности оборудования, в котором используется смесь веществ заданного состава.

Таблица 1.14. Данные для задачи 5:

№	Горючее вещество	
	название	содержание
1.	метилацетат $C_3H_6O_2$	20 % мас.
	циклогексан C_6H_{12}	80 % мас.
2.	бутановая кислота $C_4H_8O_2$	25 % об.
	октаналь $C_8H_{16}O$	75 % об.
3.	бензол C_6H_6	30 % мас.
	кумол C_9H_{12}	70 % мас.
4.	пропанол C_3H_8O	40 % об.
	толуол C_7H_8	60 % об.
5.	метилбутилкетон $C_6H_{12}O$	25 % об.
	амиловый спирт $C_5H_{12}O$	75 % об.
6.	бензиловый спирт C_7H_8O	20 % мас.
	ацетон C_3H_6O	30 % мас.
	этилбензол C_8H_{10}	50 % мас.
7.	<i>n</i> -метилфенол C_7H_9O	30 % об.
	изопропилбензол C_9H_{12}	40 % об.
	бутилформиат $C_5H_{10}O_2$	30 % об.
8.	пропаналь C_3H_6O	40 % об.
	декан $C_{10}H_{22}$	50 % об.
	диоксан $C_4H_8O_2$	10 % об.
9.	уксусная кислота $C_2H_4O_2$	5 % мас.
	диэтилкетон $C_5H_{10}O$	10 % мас.
	дибутилкетон $C_9H_{18}O$	85 % мас.
10.	метилпропилкетон $C_5H_{10}O$	15 % об.
	анилин C_6H_7N	30 % об.
	бутанон C_4H_8O	55 % об.

Глава 2. Самовозгорание веществ и материалов

Все горючие вещества при контакте с воздухом при определенных температурах начинают окисляться. Этот процесс сопровождается выделением тепла и может привести к самонагреванию системы, которое при условии достижения критической температуры приведет к возникновению горения [3], [8], [14], [25].

Самонагревание – это повышение температуры системы за счет превышения скорости тепловыделения экзотермических процессов в ней над скоростью теплоотдачи от системы в окружающую среду.

Наименьшая температура горючей системы, при которой возникает самонагревание вещества, называется *температурой самонагревания*.

Температура самонагревания некоторых горючих веществ может быть ниже комнатной температуры. Химические реакции с энергией активации меньше $42 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1}$ протекают при комнатной температуре очень быстро и заканчиваются возникновением горения. Как правило, процесс самонагревания протекает при температуре окружающей среды не меньше $10 \text{ }^\circ\text{C}$ (при более низких температурах резко возрастает интенсивность теплоотдачи). Вещества с температурой самонагревания ниже $50 \text{ }^\circ\text{C}$ называют *пирофорными веществами*.

Процесс возникновения горения за счет самонагревания системы вследствие накопления тепла внутри самой системы под воздействием внутренних экзотермических процессов при благоприятных условиях и отсутствии источника зажигания называют *самовозгоранием*.

В зависимости от причин, которые вызывают процесс первичного самонагревания вещества, различают четыре вида самовозгорания: физическое, химическое, микробиологическое и тепловое.

Физическим называется самовозгорание, вызванное самонагреванием материала вследствие тепловыделения физических процессов.

Характерными физическими процессами, которые приводят к самовозгоранию, это процесс трения и адсорбции. Адсорбция – поглощение и удержание паров и газов на поверхности твердого вещества за счет межмолекулярного взаимодействия.

К физическому самовозгоранию склонны лишь твердые горючие материалы с развитой поверхностью, среди которых наиболее характерными являются угли.

Химическим называется самовозгорание, которое возникает вследствие взаимодействия веществ, которые реагируют с выделением тепла.

Микробиологическое самовозгорание - возникновение горения вследствие саморазогревания растительных продуктов под влиянием тепловыделения в результате жизнедеятельности растительных клеток и микроорганизмов.

Тепловое самовозгорание – возникновение горения вследствие самонагревания, обусловленного продолжительным влиянием внешнего нагревания вещества выше температуры самонагревания. Резкое повышение скорости экзотермических реакций в объеме вещества связано, в основном, с возрастанием температуры в зоне реакций под влиянием теплового импульса.

Не следует считать, что указанные виды самовозгорания могут происходить изолировано друг от друга, в "чистом" виде. В большинстве случаев вид

самовозгорания определяют с учетом *первопричины протекания экзотермического процесса*: на каком-то этапе данный процесс заканчивается и "передает эстафету" другому экзотермическому процессу.

Процесс самовозгорания можно разделить на два основных этапа: самонагревание и, собственно, возникновение горения. Первый этап характеризуется сравнительно плавным изменением параметров системы (температуры, состава газовой среды и др.) и протекает на протяжении значительного промежутка времени. Началу второго этапа присущ высокий динамизм физических и химических процессов и быстрое изменение параметров.

Поскольку подведение тепла к системе извне отсутствует, условия выделения и отдачи тепла при самовозгорании имеют определяющее значение. Рост температуры в процессе самонагревания обусловлен накоплением тепла в условиях, благоприятных для хорошей теплоизоляции материала.

На скорость протекания процесса самонагревания, а значит, и на склонность материалу к самовозгоранию, более всего будут влиять такие факторы:

- "тепловой эффект экзотермических процессов ($Q \uparrow - t_{сн} \downarrow$);
- "концентрация кислорода в окислительной среде ($\varphi_{O_2} \uparrow - t_{сн} \downarrow$);
- величина поверхности окисления, т.е. степень измельчения или пористость материала, неравномерность его нахождения в объеме ($S_{ок} \uparrow - t_{сн} \downarrow$);
- скорость поступления окислителя в толщу материала ($V_{вет} \uparrow$ (дополнительное поступление кислорода) – $t_{сн} \downarrow$; $V_{вет} \uparrow \uparrow$ (дополнительное охлаждение избытком воздуха) – $t_{сн} \uparrow$);
- теплофизические характеристики материала: плотность, теплоемкость, теплопроводность ($\rho, c_p, \lambda \uparrow - t_{сн} \uparrow$);
- коэффициент конвекционной теплоотдачи ($\alpha \uparrow - t_{сн} \uparrow$);
- начальная температура среды ($t_{нач} \uparrow - t_{сн} \downarrow$);
- удельная поверхность теплоотдачи, т.е. отношение площади теплоотдачи к объему системы ($S_{уд} \uparrow - t_{сн} \uparrow$).

Время индукции при самовозгорании изменяется в очень широких границах и может длиться на протяжении нескольких недель и даже месяцев.

2.1 Химическое самовозгорание

В зависимости от характера окислителя, который вступает в реакцию с горючим материалом, химическое самовозгорание бывает трех видов [3]:

- самовозгорание при контакте с кислородом воздуха;
- самовозгорание при контакте с водой;
- самовозгорание при контакте с химическим окислителем.

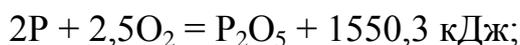
Во всех указанных случаях тепло, которое выделяется во время реакции, может нагреть горючие вещества, которые выделяются вследствие реакции или находятся в контакте, до критической температуры самовоспламенения или тления.

К химическому самовозгоранию при *контакте с кислородом воздуха* склонны:

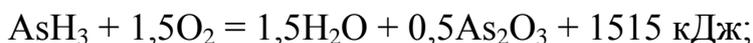
1) щелочные, щелочноземельные металлы, алюминий (рубидий и цезий самовозгораются в кусковом виде, другие – только в виде порошков):



2) белый и желтый фосфор:



3) гидриды неметаллов: SiH₄, PH₃, AsH₃:



4) пиррофорное сернистое железо: сульфиды FeS, FeS₂, Fe₂S₃:



5) металлоорганические соединения, например, этилат натрия C₂H₅ONa, диэтилалюминийхлорид (C₂H₅)₂AlCl, триэтилалюминий (C₂H₅)₃Al, диэтилцинк Zn(C₂H₅)₂;

б) некоторые жиры и масла растительного происхождения, а также пропитанные ими горючие материалы.

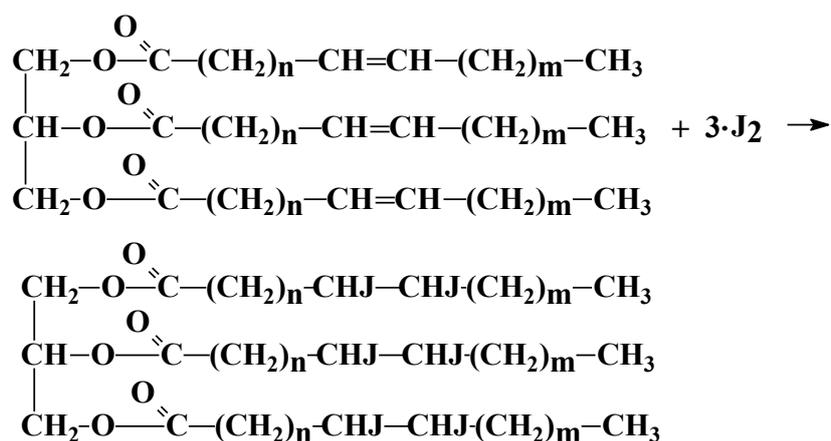
Жиры и масла растительного происхождения представляют собой смесь глицеридов – сложных эфиров трехатомного спирта глицерина с высокомолекулярными ненасыщенными или насыщенными (жирными) карбоновыми кислотами. Молекулы диглицеридов имеют общую формулу C₃H₅OH(COOR)₂, триглицеридов – C₃H₅(COOR)₃, где R – углеводородный радикал карбоновой кислоты с неразветвленной цепью атомов углерода. Радикал карбоновой кислоты может быть насыщенным или ненасыщенным (чаще всего в составе масел встречаются двойные связи между атомами углерода).

Самонагревание с дальнейшим самовозгоранием масла и пропитанного маслом горючего материала происходит за счет тепловыделения реакций окисления и полимеризации, протекающих по местам двойных связей в цепи карбоновой кислоты, при наличии условий для аккумуляции тепла.

Насыщенные карбоновые кислоты с общей формулой C_nH_(2n+1)COOH (например, пальмитиновая кислота C₁₅H₃₁COOH) имеют низкую химическую активность и при низких температурах не полимеризуются и не окисляются. Ненасыщенные карбоновые кислоты олеинового ряда содержат одну двойную связь и имеют общую формулу C_nH_(2n-1)COOH, например, деценовая кислота C₉H₁₇COOH. Увеличение количества ненасыщенных связей в глицериде увеличивает склонность масла к самовозгоранию.

Определить количество двойных связей можно с помощью *йодометрического метода*. Данный метод основывается на способности галогенов (йода) присоединяться к органическим соединениям в местах двойных связей.

Реакцию присоединения йода к двойной связи радикала карбоновой кислоты в составе глицериде можно представить следующей схемой:



По количеству йода, вступившего в реакцию присоединения, можно судить о наличии ненасыщенных связей и о склонности жира или масла, в состав которых они входят, к самовозгоранию. Чем больше йода прореагирует с данной массой исследуемого вещества, тем выше ее ненасыщенность, а значит, и склонность к самовозгоранию. Критерием такой оценки служит *йодное число* ($J_{\text{ч}}$), которое показывает, сколько граммов йода присоединится в условиях опыта (или по расчету) к 100 граммам масла. Йодное число некоторых масел приведено в табл. 2.1.

Если $J_{\text{ч}} < 50$, масло не склонно к самовозгоранию, а если $J_{\text{ч}} > 50$ – склонно.

Экспериментально йодное число определяется по методикам Гюбля, Вейса, Виноградова и других исследователей. Если известен качественный и количественный состав масла, йодное количество можно определить по расчету.

Очень опасным в практической деятельности на производстве и в быту является химическое самовозгорание при *контакте с водой*.

Реакции некоторых веществ с водой или влагой воздуха протекают с выделением значительного количества тепла, под действием которого горючие продукты реакции и исходные вещества возгораются, а негорючие материалы нагреваются до высокой температуры и могут вызвать загорание горючих веществ, которые находятся вблизи зоны реакции.

В зависимости от состава исходных веществ при реакции с водой образуются разные газообразные продукты реакции: водород, ацетилен, метан, этан и другие газы. Именно эти газы сперва будут вспыхивать под влиянием тепла химической реакции.

К веществам, которые самовозгораются при контакте с водой, можно отнести щелочные металлы, гидриды металлов (NaNH_2 ; KNH_2 ; CaH_2), оксиды и пероксиды металлов (CaO , Na_2O_2), карбиды металлов (CaC_2 , K_2C_2), фосфиды и силициды разных металлов, некоторые металлоорганические соединения.

Таблица 2.1 – Йодное число некоторых масел и жиров

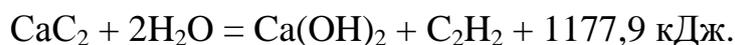
Масло	Йодное число	Масло	Йодное число
скипидарное	300	оливковое	84÷90
перилловое	190÷206	пальмовое	10÷84
льняное	170÷200	какао	32÷36
тунговое	154÷176	пальмоядерное	12÷20
конопляное	145÷167	кокосовое	7÷10
ойтисиковое	140÷160	Жиры:	
сафлоровое	130÷155	сардиновый	170÷190
ореховое	131÷143	тресковый	160÷180
маковое	132÷157	моржовый	160
рыжейное	132÷155	дельфиний	130÷140
рапсовое	128÷132	тюлений	122÷162
подсолнечное	127÷136	селедочный	115÷146
соевое	114÷139	китовый	102÷144
кукурузное	111÷133	солемас техн.	70÷80
хлопковое	100÷120	кашалотовый	62–123
кунжутное	110	свиной	46÷66
горчичное	96÷107	костный	39÷50
миндальное	92÷105	говяжий	32÷47
арахисовое	92	бараний	31÷46
касторовое	84÷90	сливочный	25÷47

Реакция щелочных металлов, гидридов щелочных и щелочноземельных металлов с водой и с влагой воздуха сопровождается выделением водорода и значительного количества тепла:



От тепла реакции самовоспламеняется водород и самовозгораются металл или гидрид металла.

Взаимодействие карбидов щелочных и щелочноземельных металлов с водой протекает очень бурно и может закончиться взрывом. При этом металлы сгорают полностью, а углерод выделяется в свободном состоянии или в виде ацетилена:



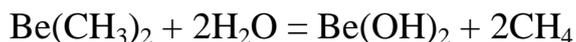
При взаимодействии карбидов металлов со стехиометрическим количе-

ством воды выделяется столько тепла, что система разогревается до 920 °С (карбид кальция) и ацетилен, образующийся в ходе реакции, самовоспламеняется.

Силициды разных металлов при контакте с водой выделяют гидрид кремния (силан), который самовоспламеняется на воздухе:

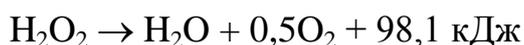


Некоторые металлоорганические соединения реагируют с водой, образуя горючие газы. Например, диметилбериллий при взаимодействии с водой выделяет метан, а диэтилмагний – этан:



Теплота, которая выделяется при этом, приводит к загоранию образующегося газа и исходного вещества.

Некоторые вещества при взаимодействии с водой не образуют горючих продуктов, но теплота, выделяющаяся во время реакции, разогревает эти вещества до высоких температур, что содействует возникновению горения других горючих материалов, находящихся вблизи зоны реакции. К таким веществам относятся оксиды и пероксиды металлов, хлорид алюминия, серная кислота, хлорсульфоновая кислота и др. Например, оксид кальция (негашеная известь), реагируя с небольшим количеством воды, разогревается к свечению и может произвести к зажигание расположенных вблизи него горючих материалов. При взаимодействии перекиси натрия с водой образуется перекись водорода, склонная к самовольному разложению с образованием воды и кислорода также с выделением тепла:



При контакте с химическими окислителями самовозгорается большинство горючих материалов органического происхождения. Возможность самовозгорания при этом в значительной степени зависит от свойств окислителя. В зависимости от агрегатного состояния окислителя процесс самовозгорания при контакте с химическими окислителями разделяют на три подкласса:

- при контакте с газообразными окислителями;
- при контакте с жидкими окислителями;
- при контакте с твердыми окислителями.

К наиболее распространенным газам-окислителям относятся фтор, хлор, кислород, озон. Они активно соединяются с рядом веществ, причем реакция сопровождается выделением большого количества тепла, вследствие чего вещества самовозгораются.

К основным жидким окислителям относят пероксид водорода, пероксиды щелочных и щелочноземельных металлов, кислородосодержащие кислоты.

К твердым окислителям относятся оксиды металлов с высокой степенью окисления (оксид хрома CrO_3 , оксид марганца Mn_2O_7), соли кислородосодер-

жащих кислот с высокой степенью окисления (хромат и дихромат калия, перманганат калия, хлорат и перхлорат калия, азотнокислое серебро, персульфат аммония $(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_8$; аммиачная и калиевая селитра) и некоторые другие вещества, которые применяются в качестве удобрения и ядохимикатов в сельском хозяйстве. Например, при контакте такого сильного окислителя как перманганат калия с многоатомными спиртами (этиленгликоль, глицерин и т.п.) происходит самовозгорание буквально через несколько секунд после их смешивания:



Твердые горючие материалы (бумага, текстиль, опилки, хлопок и др.) при контакте с подобными окислителями нагреваются до температуры тления и самовозгораются.

2.2 Методика расчетного определения склонности к самовозгоранию жиров и масел

1. Установить тип глицеридов карбоновых кислот в составе масла или жира по таблицам 5, 6 приложения.

2. Рассчитать молярную массу каждого глицерида в составе масла μ_i .

3. Определить степень ненасыщенности (количество двойных связей) карбоновой кислоты каждого глицерида в составе масла или жира.

3.1. Определить углеводородный радикал карбоновой кислоты в составе глицерида $\text{R} = \text{C}_n\text{H}_m$, где n – количество атомов углерода в составе углеводородного радикала; m – количество атомов водорода в составе углеводородного радикала.

3.2. Определить нехватку атомов водорода "х" для насыщенного состояния радикала карбоновой кислоты каждого глицерида, учитывая, что количество атомов водорода в насыщенном радикале карбоновой кислоты определяется количеством атомов углерода n и равняется $(2n + 1)$. Тогда недостаток водорода "х" можно рассчитать как:

$$m = 2n + 1 - x; \quad x = 2n + 1 - m \quad (2.1)$$

Насыщенные кислоты имеют $x = 0$.

3.3. Определить количество ненасыщенных связей в радикале карбоновой кислоты каждого глицерида z . Поскольку по месту двойной связи возможно присоединение двух атомов водорода, количество двойных связей будет вдвое меньше:

$$z = \frac{x}{2} \quad (2.2)$$

4. Определить количество ненасыщенных связей в составе каждого глицерида:

$$Z = kz, \quad (2.3)$$

где z – количество ненасыщенных связей в радикале карбоновой кислоты данного глицерида; k – количество радикалов карбоновой кислоты данного типа в составе глицерида.

5. Определить эквивалентную массу йода в реакции присоединения к каждому глицериду из пропорции:

$$100 \text{ г глицерида} - J_{\text{ч}_i} \text{ г йода,} \\ \mu_i, \text{ г} \cdot \text{моль}^{-1} - Z_i \cdot 254 \text{ г} \cdot \text{моль}^{-1},$$

$$J_{\text{ч}_i} = \frac{254 \cdot Z_i \cdot 100}{\mu_i}, \text{ г,} \quad (2.4)$$

где 254 – молярная масса йода, г·моль⁻¹.

6. Если масло состоит из нескольких глицеридов, йодное число масла определяется как сумма произведений йодных чисел каждого компонента на их массовую долю в смеси:

$$J_{\text{ч}} = \sum J_{\text{ч}_i} \frac{\varphi_i}{100}, \text{ г,} \quad (2.5)$$

где φ_i – концентрация глицериду в составе масла.

7. По рассчитанному йодному числу масла, путем сравнения с критическим йодным числом $J_{\text{ч(кр)}} = 50$, сделать вывод относительно склонности масла данного состава к самовозгоранию.

2.3 Примеры решения задач

Задача 1. Определить расчетом склонность к самовозгоранию растительного масла такого состава: триглицериды эруковой кислоты – 54 %, олеиновой кислоты – 16 %, линолевой кислоты – 16 %, линоленовой кислоты – 10 %, пальмитиновой кислоты – 4 %.

Решение

1. Данное растительное масло в своем составе имеет пять компонентов, химический состав которых определяем по таблице 6 приложения:

№	триглицерид	формула	содержание
1	эруковой кислоты	$C_3H_5(COOC_{21}H_{41})_3$	54 %
2	олеиновой кислоты	$C_3H_5(COOC_{17}H_{33})_3$	16 %
3	линолевой кислоты	$C_3H_5(COOC_{17}H_{31})_3$	16 %
4	линоленовой кислоты	$C_3H_5(COOC_{17}H_{29})_3$	10 %
5	пальмитиновой кислоты	$C_3H_5(COOC_{15}H_{31})_3$	4 %

2. Рассчитываем молярную массу триглицеридов карбоновых кислот по количеству атомов данного типа:



$$\mu_1 = 12 \cdot 3 + 5 \cdot 1 + (12 + 16 \cdot 2 + 12 \cdot 21 + 41 \cdot 1) \cdot 3 = 1052 \text{ г} \cdot \text{моль}^{-1};$$



$$\mu_2 = 12 \cdot 3 + 5 \cdot 1 + (12 + 16 \cdot 2 + 12 \cdot 17 + 33 \cdot 1) \cdot 3 = 884 \text{ г} \cdot \text{моль}^{-1};$$



$$\mu_3 = 12 \cdot 3 + 5 \cdot 1 + (12 + 16 \cdot 2 + 12 \cdot 17 + 31 \cdot 1) \cdot 3 = 878 \text{ г} \cdot \text{моль}^{-1};$$



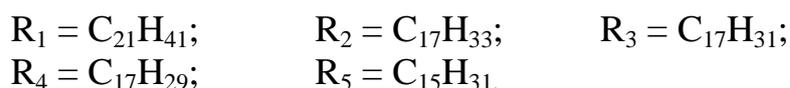
$$\mu_4 = 12 \cdot 3 + 5 \cdot 1 + (12 + 16 \cdot 2 + 12 \cdot 17 + 29 \cdot 1) \cdot 3 = 872 \text{ г} \cdot \text{моль}^{-1};$$



$$\mu_5 = 12 \cdot 3 + 5 \cdot 1 + (12 + 16 \cdot 2 + 12 \cdot 15 + 31 \cdot 1) \cdot 3 = 816 \text{ г} \cdot \text{моль}^{-1}.$$

3. Определяем степень ненасыщенности карбоновой кислоты в составе каждого глицерида.

3.1. Определяем углеводородный радикал карбоновой кислоты $R_i = C_nH_m$ в составе каждого глицерида:



3.2. Определяем нехватку атомов водорода к насыщенному состоянию в радикале карбоновой кислоты по формуле (2.1):

$$\begin{array}{ll} C_{21}H_{41}: & x_1 = 2 \cdot 21 + 1 - 41 = 2; \\ C_{17}H_{33}: & x_2 = 2 \cdot 17 + 1 - 33 = 2; \\ C_{17}H_{31}: & x_3 = 2 \cdot 17 + 1 - 31 = 4; \\ C_{17}H_{29}: & x_4 = 2 \cdot 17 + 1 - 29 = 6; \\ C_{15}H_{31}: & x_5 = 2 \cdot 15 + 1 - 31 = 0. \end{array}$$

3.3. Определяем количество ненасыщенных связей в радикале карбоновой кислоты глицерида по формуле (2.2):

$$z_1 = \frac{2}{2} = 1; \quad z_2 = \frac{2}{2} = 1; \quad z_3 = \frac{4}{2} = 2; \quad z_4 = \frac{6}{2} = 3; \quad z_5 = \frac{0}{2} = 0.$$

4. Определяем количество ненасыщенных связей в глицериде по формуле (2.3).

Поскольку триглицериды содержат 3 радикала карбоновой кислоты, то $k = 3$:

$$Z_1 = 3 \cdot 1 = 3; \quad Z_2 = 3 \cdot 1 = 3; \quad Z_3 = 3 \cdot 2 = 6;$$

$$Z_4 = 3 \cdot 3 = 9; \quad Z_5 = 3 \cdot 0 = 0.$$

5. Определяем массу йода в реакции присоединения к триглицериду по формуле (2.5):

$$J_{u_1} = \frac{254 \cdot 3 \cdot 100}{1052} = 72,4 \text{ г}; \quad J_{u_2} = \frac{254 \cdot 3 \cdot 100}{884} = 86,2 \text{ г};$$

$$J_{u_3} = \frac{254 \cdot 6 \cdot 100}{878} = 173,1 \text{ г}; \quad J_{u_4} = \frac{254 \cdot 9 \cdot 100}{872} = 262,2 \text{ г}.$$

Поскольку триглицерид пальмитиновой кислоты не содержит двойных связей, он не способен к окислению и не вступает в реакцию присоединения йода, поэтому, $J_{u_5} = 0$.

6. Рассчитываем йодное число рапсового масла по формуле (2.5):

$$J_{\text{ч}} = 72,4 \frac{54}{100} + 86,2 \frac{16}{100} + 173,1 \frac{16}{100} + 262,2 \frac{10}{100} = 106,9 \text{ г}.$$

Вывод: йодное число данного масла больше 50г, поэтому масло такого состава склонно к химическому самовозгоранию.

Задача 2. Определить способность к самовозгоранию жира следующего состава: диглицерид линолевой кислоты - 40 %, динасыщенный-мононенасыщенный триглицерид линоленовой и стеариновой кислот – 60 %.

Решение

1. Исходя из общей формулы глицеридов и химического состава кислот (табл. 6 приложений), определяем:

а) структуру молекулы диглицерида линолевой кислоты:

общая формула диглицерида – $C_3H_5OH(COOR)_2$, линолевая кислота – одноосновная карбоновая кислота с двумя изолированными двойными связями $C_{17}H_{31}COOH$, т.е., диглицерид линолевой кислоты имеет формулу $C_3H_5OH(COOC_{17}H_{31})_2$;

б) структуру молекулы динасыщенного- мононенасыщенного триглицерида линоленовой и стеариновой кислот:

общая формула триглицерида – $C_3H_5(COOR)_3$, линоленовая кислота – одноосновная карбоновая кислота с тремя изолированными двойными связями $C_{17}H_{29}COOH$, стеариновая кислота – одноосновная насыщенная карбоновая кислота $C_{17}H_{35}COOH$, т.е., динасыщенный-мононенасыщенный триглицерид линоленовой и стеариновой кислот имеет формулу $C_3H_5(COOC_{17}H_{35})_2(COOC_{17}H_{29})$.

2. Рассчитываем молярную массу глицеридов карбоновых кислот по количеству атомов данного типа:



$$\mu_1 = 12 \cdot 3 + 5 \cdot 1 + 16 + 1 + (16 \cdot 2 + 12 \cdot 18 + 31 \cdot 1) \cdot 2 = 616 \text{ г} \cdot \text{моль}^{-1};$$

$$\text{C}_3\text{H}_5(\text{COOC}_{17}\text{H}_{35})_2(\text{COOC}_{17}\text{H}_{29}):$$

$$\mu_2 = 12 \cdot 3 + 5 \cdot 1 + (16 \cdot 2 + 12 \cdot 18 + 35 \cdot 1) \cdot 2 +$$

$$+ (16 \cdot 2 + 12 \cdot 18 + 29 \cdot 1) = 872 \text{ г} \cdot \text{моль}^{-1}.$$

3. Определяем степень ненасыщенности (количество двойных связей) карбоновых кислот каждого глицерида:

3.1. Определяем углеводородный радикал карбоновой кислоты:

– в составе диглицерида: $R_1 = \text{C}_{17}\text{H}_{31}$;

– в составе триглицерида: $R_2 = \text{C}_{17}\text{H}_{35}$, $R_3 = \text{C}_{17}\text{H}_{29}$.

3.2. Определяем нехватку атомов водорода "х" для насыщенного состояния радикала карбоновой кислоты каждого глицерида по формуле (2.):

$$\text{C}_{17}\text{H}_{31}: \quad x_1 = 2 \cdot 17 + 1 - 31 = 4;$$

$$\text{C}_{17}\text{H}_{35}: \quad x_2 = 2 \cdot 17 + 1 - 35 = 0;$$

$$\text{C}_{17}\text{H}_{29}: \quad x_3 = 2 \cdot 17 + 1 - 29 = 6.$$

3.3. Определяем количество ненасыщенных связей в радикале карбоновой кислоты каждого глицерида по формуле (2.2):

$$\text{– в составе линолевой кислоты} \quad z_1 = \frac{4}{2} = 2;$$

$$\text{– в составе стеариновой кислоты} \quad z_2 = \frac{0}{2} = 0;$$

$$\text{– в составе линоленовой кислоты} \quad z_3 = \frac{6}{2} = 3.$$

4. Определяем количество ненасыщенных связей в глицериде по формуле (2.3).

Из-за того, что диглицерид содержит 2 радикала линолевой кислоты, $k_1 = 2$, то общее количество ненасыщенных связей в составе диглицерида линолевой кислоты:

$$Z_1 = 2 \cdot 2 = 4$$

В состав второго глицерида входят два радикала стеариновой кислоты ($k_2 = 2$) и один радикал линоленовой кислоты ($k_3 = 1$), поэтому, общее количество ненасыщенных связей в составе ди- и мононенасыщенного триглицерида составляет:

$$Z_2 = 2 \cdot 0 + 1 \cdot 3 = 3.$$

5. Определяем массу йода в реакции присоединения к каждому глицериду

по формуле (2.4):

$$J_{\text{ч}_1} = \frac{254 \cdot 4 \cdot 100}{616} = 165 \text{ г}; \quad J_{\text{ч}_2} = \frac{254 \cdot 3 \cdot 100}{872} = 87 \text{ г}.$$

6. Рассчитываем йодное число исходной смеси глицеридов по формуле (2.5):

$$J_{\text{ч}} = 165 \cdot \frac{40}{100} + 87 \cdot \frac{60}{100} = 118,2 \text{ г}.$$

Вывод: поскольку йодное число смеси составило $J_{\text{ч}} = 118,2$ г, что больше критического значения йодного числа (50 г), то данный жир склонен к самовозгоранию.

2.4 Методика определения возможности возникновения горения под влиянием экзотермического эффекта химической реакции

1. Рассчитать массы начальных реагентов и продуктов реакции.

1.1. Составить уравнение химической реакции.

1.2. Исходя из уравнения реакции и массы реагирующего вещества, определить массу компонентов (например, воды), вступающих в реакцию, и массу продуктов реакции, образующихся вследствие этой реакции, из пропорций:

$$\begin{aligned} \mu_{\text{в}} &\rightarrow \mu_{\text{к}} n_{\text{к}}, & \mu_{\text{в}} &\rightarrow \mu_{\text{пр}} n_{\text{пр}}, \\ m_{\text{в}} &\rightarrow m_{\text{к}}; & m_{\text{в}} &\rightarrow m_{\text{пр}}; \\ m_{\text{к}} &= \mu_{\text{к}} n_{\text{к}} \frac{m_{\text{в}}}{\mu_{\text{в}}}; & m_{\text{пр}} &= \mu_{\text{пр}} n_{\text{пр}} \frac{m_{\text{в}}}{\mu_{\text{в}}}, \end{aligned} \quad (2.6)$$

где $\mu_{\text{в}}$, $\mu_{\text{к}}$, $\mu_{\text{пр}}$ – соответственно молярная масса реагирующего вещества, компонентов, которые вступают в реакцию, и продуктов реакции, г·моль⁻¹;

$m_{\text{в}}$, $m_{\text{к}}$, $m_{\text{пр}}$ – соответственно начальная масса реагирующего вещества, компонентов, которые вступают в реакцию, и продуктов реакции, г;

$n_{\text{к}}$, $n_{\text{пр}}$ – соответственно количество молей компонентов, вступающих в реакцию и продуктов реакции.

2. Рассчитать составляющие теплового баланса реакции.

Тепловой баланс реакции рассчитывают из предположения, что теплота реакции $Q_{\Sigma\text{хр}}$ расходуется на нагрев и частичное испарение компонентов, вступающих в реакцию (например, воды $Q_{\text{H}_2\text{O}}$ при условии самовозгорания веществ при контакте с водой), нагрев негорючих конденсированных $Q_{\text{конд. пр}}$ и газообразных продуктов реакции $Q_{\text{газ. пр}}$, нагревание горючих газов, образовавшихся во время реакции, $Q_{\text{гг}}$, и потери тепла в окружающую среду $Q_{\text{пот}}$:

$$Q_{\Sigma xp} = Q_{H_2O} + Q_{\text{конд пр}} + Q_{\text{газ. пр}} + Q_{гг} + Q_{\text{пот.}} \quad (2.7)$$

2.1. Рассчитать количество теплоты, выделяющейся во время реакции исходного вещества с окислителем. В случае, если исходный материал это смесь нескольких веществ, стандартные теплоты отдельных реакций для составляющих исходного материала рассчитать по закону Гесса (1.47):

$$Q_{\Sigma xp} = \sum_i Q_{xp_i} \frac{m_{B_i}}{\mu_{B_i}}, \quad (2.8)$$

где $Q_{\Sigma xp}$ – суммарное количество тепла, выделяющегося во время реакции исходного материала с окислителем, кДж;

Q_{xp_i} – стандартный тепловой эффект реакции i -го компонента исходного материала с окислителем, кДж·моль⁻¹;

m_{B_i} – масса i -го компонента исходного материала, г;

μ_{B_i} – молярная масса i -го компонента исходного материала, г·моль⁻¹.

2.2. Рассчитать количество тепла, которое расходуется на нагрев компонентов, вступающих в реакцию, и продуктов реакции.

Принимаем, что во время химического самовозгорания при контакте с водой вся вода нагревается от начальной температуры $T_{\text{нач}}$ до температуры кипения $T_{\text{кип}}$, а 50 % воды испаряется, тогда:

$$Q_{H_2O} = m_{H_2O} c_{pH_2O}(T_{\text{кип}} - T_{\text{нач}}) + 0,5 \cdot m_{H_2O} \Delta H_{\text{исп}}, \quad (2.9)$$

где c_{pH_2O} – удельная массовая теплоемкость воды при постоянном давлении, кДж·кг⁻¹·К⁻¹;

$\Delta H_{\text{исп}}$ – массовая теплота испарения воды, кДж·кг⁻¹.

При образовании горючих газов исходим из вероятности их самовоспламенения, т.е. допускаем, что горючие газы нагреваются от начальной температуры до температуры их самовоспламенения $T_{\text{св}}$:

$$Q_{гг} = m_{гг} \cdot c_{p гг} (T_{\text{св}} - T_{\text{нач}}), \quad (2.10)$$

где $c_{p гг}$ – удельная массовая теплоемкость образующихся горючих газов, при постоянном давлении, кДж·кг⁻¹·К⁻¹.

Негорючие продукты реакции (конденсированные или газообразные) нагреваются от начальной температуры до температуры зоны реакции $T_{\text{зр}}$, тогда:

$$Q_{\text{конд. пр}} = m_{\text{конд. пр}} c_{p \text{ конд пр}} (T_{\text{зр}} - T_{\text{нач}}); \quad (2.11)$$

$$Q_{\text{газ. пр}} = m_{\text{газ. пр}} c_{p \text{ газ. пр}} (T_{\text{зр}} - T_{\text{нач}}), \quad (2.12)$$

где $c_{p \text{ конд.пр}}$ – удельная массовая теплоемкость конденсированного продукта реакции при постоянном давлении, $\text{кДж} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$;

$c_{p \text{ газ.пр}}$ – удельная массовая теплоемкость негорючего газообразного продукта реакции при постоянном давлении, $\text{кДж} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$.

2.3. Рассчитать потери тепла от зоны реакции в окружающую среду.

Принимаем, что потери тепла в окружающую среду происходят путем конвекционного теплообмена, на который расходуется 10 % от суммарной теплоты реакции:

$$Q_{\text{пот}} = 0,1 \cdot Q_{\Sigma \text{хр}} \quad (2.13)$$

3. Рассчитать температуру зоны реакции.

Поскольку температура зоны реакции не известна, сперва из теплового баланса (2.) находим количество тепла, которое тратится на нагревание негорючих продуктов реакции:

- при образовании только конденсированных негорючих продуктов реакции $Q_{\text{конд.пр}}$:

$$Q_{\text{конд. пр}} = Q_{\Sigma \text{хр}} - (Q_{\text{H}_2\text{O}} + Q_{\text{ГГ}} + Q_{\text{пот}}) \quad (2.14)$$

- при образовании конденсированных негорючих продуктов и негорючих газов:

$$Q_{\text{конд. пр.}} + Q_{\text{газ. пр}} = Q_{\Sigma \text{хр}} - (Q_{\text{H}_2\text{O}} + Q_{\text{ГГ}} + Q_{\text{пот}}) \quad (2.15)$$

Температуру зоны реакции находим по теплоте, до которой нагреваются продукты реакции, по формулам (2.11), (2.12) и (2.16):

- при условии образования только конденсированных негорючих продуктов реакции:

$$T_{\text{зр}} = T_{\text{нач}} + \frac{Q_{\Sigma \text{хр}} - (Q_{\text{H}_2\text{O}} + Q_{\text{ГГ}} + Q_{\text{пот}})}{m_{\text{конд.пр}} c_{p \text{ конд.пр}}} \quad (2.16)$$

- при условии образования конденсированных негорючих продуктов и негорючих газов:

$$T_{\text{зр}} = T_{\text{нач}} + \frac{Q_{\Sigma \text{хр}} - (Q_{\text{H}_2\text{O}} + Q_{\text{ГГ}} + Q_{\text{пот}})}{m_{\text{конд.пр}} c_{p \text{ конд.пр}} + m_{\text{газ.пр}} c_{p \text{ газ.пр}}} \quad (2.17)$$

4. Сравнить температуру зоны реакции $T_{\text{зр}}$ с критической температурой горючего компонента (температурой самовоспламенения для горючих газов или

температурой тления для твердых горючих веществ).

Если температура зоны реакции больше, чем критическая температура горючего компонента, то самовозгорание может возникнуть за счет экзотермического эффекта химической реакции.

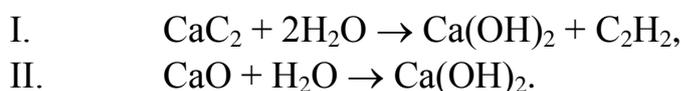
2.5 Примеры решения задач

Задача 1. Рассчитать возможность возникновения химического самовозгорания при контакте с водой 1 кг технического карбида кальция, который содержит 75 % CaC_2 и 20 % CaO . Начальная температура системы равняется 20°C , избыток воды, который попал в зоне реакции, составляет 30 %.

Решение

1. Рассчитываем массы начальных реагентов и продуктов реакции на основании материального баланса реакции.

1.1. Составляем уравнение реакции составляющих компонентов технического карбида с водой:



1.2. Рассчитываем по формуле (2) массу воды, которая вступает в реакции I и II с составляющими технического карбида, и массу продуктов, образующимися в результате этих реакций.

По техническим характеристиками 1 кг технического карбида кальция содержит $m_{\text{CaC}_2} = 750$ г и $m_{\text{CaO}} = 200$ г. Молярные массы реагирующих веществ и продуктов реакции определяем по справочнику [9]:

$$\begin{aligned} \mu_{\text{CaC}_2} &= 64 \text{ г} \cdot \text{моль}^{-1}; \quad \mu_{\text{CaO}} = 56 \text{ г} \cdot \text{моль}^{-1}; \quad \mu_{\text{H}_2\text{O}} = 18 \text{ г} \cdot \text{моль}^{-1}; \\ \mu_{\text{Ca(OH)}_2} &= 74 \text{ г} \cdot \text{моль}^{-1}; \quad \mu_{\text{C}_2\text{H}_2} = 26 \text{ г} \cdot \text{моль}^{-1}. \end{aligned}$$

Для протекания реакций I и II в стехиометрическом соотношении необходимо воды:

$$m_{\text{H}_2\text{O}}(\text{стм}) = 18 \cdot 2 \cdot \frac{750}{64} + 18 \cdot \frac{200}{56} = 486 \text{ г.}$$

С учетом избытка воды, попавшей в зону реакции:

$$m_{\text{H}_2\text{O}} = 486 \cdot 1,3 = 632 \text{ г.}$$

Масса гашеной извести Ca(OH)_2 , образующейся в процессе реакций I и II:

$$m_{\text{Ca(OH)}_2} = 74 \cdot \frac{750}{64} + 74 \cdot \frac{200}{56} = 1132 \text{ г.}$$

Масса ацетилена, образующегося в процессе реакции I:

$$m_{C_2H_2} = 26 \cdot \frac{750}{64} = 304 \text{ г.}$$

2. Рассчитываем тепловой баланс реакции.

2.1. Рассчитываем суммарное количество теплоты, выделяющейся при реакции технического карбида с водой, по формуле (2.8). Стандартные тепловые эффекты реакций I и II рассчитываем по закону Гесса (1.47). Теплоты образования реагирующих веществ и продуктов реакции определяем по справочнику [9].

$$Q_{\text{xp I}} = \left| \begin{array}{l} n_{C_2H_2} \Delta H_{f,C_2H_2}^{\circ} + n_{Ca(OH)_2} \Delta H_{f,Ca(OH)_2}^{\circ} - \\ - (n_{H_2O} \Delta H_{f,H_2O(p)}^{\circ} + n_{CaC_2} \Delta H_{f,CaC_2}^{\circ}) \end{array} \right| =$$

$$= |226,8 + (-986,6) - 2 \cdot (-285,8) - (-62,7)| =$$

$$= 125,5 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1};$$

$$Q_{\text{xp II}} = \left| \begin{array}{l} n_{Ca(OH)_2} \Delta H_{f,Ca(OH)_2}^{\circ} - \\ - (n_{H_2O} \Delta H_{f,H_2O(p)}^{\circ} + n_{CaO} \Delta H_{f,CaO}^{\circ}) \end{array} \right| =$$

$$= |(-986,6) - (-285,8) - (-635,5)| = 65,3 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1};$$

$$Q_{\Sigma \text{xp}} = 125,5 \frac{750}{64} + 65,3 \frac{200}{56} = 1704 \text{ кДж.}$$

2.2. Рассчитываем количество тепла, расходуемого на нагрев воды и продуктов реакции, по формулам (2.9)– (2.11).

Из справочника [9] выписываем теплофизические характеристики исходных веществ и продуктов реакции:

$$c_{p,H_2O} = 4,18 \cdot \text{кДж} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}; \quad \Delta H_{\text{исп.}H_2O} = 2258,4 \text{ кДж} \cdot \text{кг}^{-1};$$

$$c_{p,Ca(OH)_2} = 1,18 \text{ кДж} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}; \quad c_{p,C_2H_2} = 1,69 \text{ кДж} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{K}^{-1};$$

$$t_{\text{св} C_2H_2} = 335 \text{ }^{\circ}\text{C} (608 \text{ K}).$$

$$Q_{H_2O} = 0,632 \cdot 4,18 \cdot (100 - 20) + 0,5 \cdot 0,632 \cdot 2258,4 = 925,0 \text{ кДж};$$

$$Q_{C_2H_2} = 0,304 \cdot 1,69 \cdot (335 - 20) = 161,8 \text{ кДж};$$

$$Q_{Ca(OH)_2} = 1,132 \cdot 1,18 \cdot (t_{\text{зр}} - 20)$$

2.3. Рассчитываем потери тепла от зоны реакции в окружающую среду по формуле (2.13):

$$Q_{\text{пот}} = 0,1 \cdot 1704 = 170,4 \text{ кДж}$$

3. Рассчитываем температуру зоны реакции по формуле (2.16):

$$T_{\text{зр}} = 293 + \frac{1704 - (925,0 + 161,8 + 170,4)}{1,132 \cdot 1,18} = 627,5 \text{ К.}$$

4. Вывод: температура зоны реакции $T_{\text{зр}} = 627,5 \text{ К}$ превышает температуру самовоспламенения ацетилена $T_{\text{св}} = 608 \text{ К}$, поэтому при реакции технического карбида с водой (при условии наличия избытка воды не больше 30 %) состоится самовоспламенение горючего газа – ацетилена.

Задача 2. При совместном транспортировании реактивов произошла разгерметизация емкости с глицерином. Определить возможность самовозгорания опилок, которые были использованы для уплотнения емкости с глицерином при транспортировании в контейнере, пропитанной 1 л глицерина, при условии ее контакта с 10 кг перманганата калия. Начальная температура системы равняется $0 \text{ }^\circ\text{C}$.

Решение

1. Рассчитываем массы начальных реагентов и продуктов реакции на основании материального баланса реакции.

1.1. Составляем уравнение реакции 1 моля глицерина с перманганатом калия:



1.2. Рассчитываем по формуле (2) массу перманганата калия, который вступает в реакцию с глицерином, и массу продуктов, образующихся в результате этой реакции.

Молярные массы реагирующих веществ и продуктов реакции, а также плотность глицерина определяем по справочнику [9]:

$$\mu_{\text{KMnO}_4} = 158 \text{ г} \cdot \text{моль}^{-1}; \quad \mu_{\text{KOH}} = 46,1 \text{ г} \cdot \text{моль}^{-1};$$

$$\mu_{\text{MnO}} = 70,9 \text{ г} \cdot \text{моль}^{-1}; \quad \mu_{\text{CO}_2} = 44 \text{ г} \cdot \text{моль}^{-1};$$

$$\mu_{\text{H}_2\text{O}} = 18 \text{ г} \cdot \text{моль}^{-1}; \quad \mu_{\text{C}_3\text{H}_5(\text{OH})_3} = 92 \text{ г} \cdot \text{моль}^{-1};$$

$$\rho_{\text{C}_3\text{H}_5(\text{OH})_3} = 1260,4 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}.$$

Определяем массу 1 л глицерина:

$$m_{\text{C}_3\text{H}_5(\text{OH})_3} = 1260,4 \cdot 10^{-3} = 1,26 \text{ кг (1260,4 г)}.$$

Для протекания реакции в стехиометрическом соотношении необходимо перманганата калия:

$$m_{\text{KMnO}_4} (\text{ст.}) = 158 \cdot 2,8 \cdot \frac{1260,4}{92} = 6058 \text{ г.}$$

Согласно условию задачи общее количество перманганата калия составляет 10 кг, т.е. избыточная масса реагента, который не вступает в реакцию, но забирает на собственный нагрев долю теплоты химической реакции, равняется:

$$m_{\text{KMnO}_4} (\text{изб.}) = 10000 - 6058 = 3942 \text{ г.}$$

При условии полного протекания реакции образуются продукты реакции в количестве:

$$m_{\text{KOH}} = 46,1 \cdot 2,8 \cdot \frac{1260,4}{92} = 1768 \text{ г;}$$

$$m_{\text{MnO}} = 70,9 \cdot 2,8 \cdot \frac{1260,4}{92} = 2719 \text{ г;}$$

$$m_{\text{CO}_2} = 44 \cdot 3 \cdot \frac{1260,4}{92} = 1808 \text{ г;}$$

$$m_{\text{H}_2\text{O}} = 18 \cdot 2,6 \cdot \frac{1260,4}{92} = 640,9 \text{ г.}$$

2. Рассчитываем тепловой баланс реакции.

2.1. Рассчитываем суммарное количество теплоты, выделяющейся при реакции глицерина с перманганатом калия, по формуле (2.8).

Стандартный тепловой эффект реакции рассчитываем по закону Гесса (1.47). Теплоты образования реагирующих веществ и продуктов реакции определяем по справочнику [9].

$$Q_{\text{xp}} = \left| \begin{array}{l} n_{\text{KOH}} \Delta H_{\text{fKOH}}^{\circ} + n_{\text{MnO}} \Delta H_{\text{fMnO}}^{\circ} + n_{\text{CO}_2} \Delta H_{\text{fCO}_2}^{\circ} + \\ + n_{\text{H}_2\text{O}} \Delta H_{\text{fH}_2\text{O}}^{\circ} - n_{\text{KMnO}_4} \Delta H_{\text{fKMnO}_4}^{\circ} - \\ - n_{\text{C}_3\text{H}_5(\text{OH})_3} \Delta H_{\text{fC}_3\text{H}_5(\text{OH})_3}^{\circ} \end{array} \right| =$$

$$= \left| \begin{array}{l} 2,8 \cdot (-425,9) + 2,8 \cdot (-384,9) + 3 \cdot (-393,8) + \\ + 2,6 \cdot (-285,8) - 2,8 \cdot (-813,4) - (-659,9) \end{array} \right| =$$

$$= 1257,3 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1}.$$

Общий тепловой эффект реакции с учетом полной массы глицерина, принимающего участие в реакции, составляет:

$$Q_{\Sigma\text{xp}} = 1257,3 \frac{1260,4}{92} = 17225 \text{ кДж.}$$

2.2. Рассчитываем количество тепла, которое расходуется на нагрев продуктов реакции, по формулам (2.9), (2.11).

Из справочника [9] выписываем теплофизические характеристики исходных веществ и продуктов реакции:

$$c_{\text{p KOH}} = 1,3 \text{ кДж} \cdot \text{кг}^{-1} \text{K}^{-1}; \quad c_{\text{p MnO}} = 0,63 \text{ кДж} \cdot \text{кг}^{-1} \text{K}^{-1};$$

$$c_{\text{p CO}_2} = 0,84 \text{ кДж} \cdot \text{кг}^{-1} \text{K}^{-1}; \quad c_{\text{p KMnO}_4} = 0,75 \text{ кДж} \cdot \text{кг}^{-1} \text{K}^{-1};$$

$$c_{\text{p H}_2\text{O(ж)}} = 4,19 \cdot \text{кДж} \cdot \text{кг}^{-1} \text{K}^{-1}; \quad c_{\text{p H}_2\text{O(пар)}} = 2,2 \cdot \text{кДж} \cdot \text{кг}^{-1} \text{K}^{-1};$$

$$\Delta H_{\text{вип. H}_2\text{O}} = 2258,4 \text{ кДж} \cdot \text{кг}^{-1}.$$

Вода, образующаяся при реакции, нагревается от начальной температуры до температуры кипения, после чего начнет интенсивно испаряться. Пар воды, как и другие негорючие продукты реакции, нагреется до температуры зоны горения, т.е.:

$$Q_{\text{H}_2\text{O (ж)}} = 0,64 \cdot (4,18 \cdot (100 - 0) + 2258,4) = 1713,5 \text{ кДж};$$

$$Q_{\text{H}_2\text{O (пар)}} = 0,64 \cdot 2,2(t_{\text{зр}} - 100) = 1,41(t_{\text{зр}} - 100) \text{ кДж};$$

$$Q_{\text{KOH}} = 1,77 \cdot 1,3(t_{\text{зр}} - 0) = 2,3(t_{\text{зр}} - 0) \text{ кДж};$$

$$Q_{\text{MnO}} = 2,72 \cdot 0,63(t_{\text{зр}} - 0) = 1,7(t_{\text{зр}} - 0) \text{ кДж};$$

$$Q_{\text{CO}_2} = 1,81 \cdot 0,84(t_{\text{зр}} - 0) = 1,5(t_{\text{зр}} - 0) \text{ кДж};$$

$$Q_{\text{KMnO}_4} = 3,94 \cdot 0,75(t_{\text{зр}} - 0) = 2,95(t_{\text{зр}} - 0) \text{ кДж}.$$

2.3. Рассчитываем потери тепла от зоны реакции в окружающую среду по формуле (2.13):

$$Q_{\text{пот}} = 0,1 \cdot 17225 = 1722,5 \text{ кДж}.$$

3. Рассчитываем температуру зоны реакции, формула (2.16):

$$T_{\text{зр}} = 273 + \frac{17225 - (1713,5 + 1722,5)}{1,41 + 2,3 + 1,7 + 1,5 + 2,95} = 1671 \text{ К}.$$

Вывод: температура зоны реакции $T_{\text{зр}} = 1671 \text{ К}$ больше, чем температура самовоспламенения глицерина $T_{\text{св}} = 673 \text{ К}$ и температура тления опилок $420 \div 430 \text{ К}$ [7], поэтому при реакции глицерина с перманганатом калия возможно самовоспламенение пара глицерина и самовозгорание опилок, пропитанных глицерином, за счет тепла химической реакции.

2.6 Тепловое самовозгорание

При тепловом самовозгорании твердое горючее вещество нагревается до такой температуры, при которой происходит ее термическое разложение на газообразные продукты и твердый углеродистый остаток. Газообразные продукты термического разложения вступают в экзотермическую реакцию окисления с кислородом воздуха. Тепло, которое при этом выделяется, не успевает рассеяться, поскольку температура окружающей среды повышена за счет внешнего подведения тепла. Вследствие накопления тепла возникает самонагревание, которое, в свою очередь, предопределяет повышение температуры материала и ускорение процессов разложения и окисления. Постепенное повышение температуры материала приводит к окислению твердого углеродистого остатка, которое, при благоприятных условиях аккумуляции тепла, может перейти у самовозгорание сначала в виде тления твердого углеродистого остатка, а потом и с появлением пламенного горения.

Необходимыми условиями возникновения теплового самовозгорания являются:

- повышенная температура окружающей среды;
- нахождение материала в виде скопления, что определяет малую площадь теплоотдачи;
- легкость термического разложения материала с образованием достаточного количества газообразных продуктов, которые активно вступают в реакцию окисления;
- горючий материал есть пористым или раздробленным, неплотно утрамбованным, вследствие чего есть достаточный доступ кислорода вглубь вещества.

Для разработки и организации комплекса профилактических мероприятий, которые исключают возможность возникновения теплового самовозгорания, прежде всего нужно знать характеристики (параметры) материалов, которые применяются в технологических процессах, и условия, в которых находятся эти материалы [5], [8], [25].

Как первый показатель можно выделить *температуру самонагревания* вещества $t_{сн}$ – минимальную температуру среды, при которой возможно тепловое самовозгорание определенного объема (массы) материала. Это и есть та условная температурная граница, выше которой при благоприятных условиях возможно развитие экзотермического процесса самонагревания, связанное с термическим разложением веществ и окислением продуктов разложения.

Вторым показателем является *время индукции* $\tau_{инд}$ – время с момента, когда температура материала достигнет $t_{сн}$, до момента возникновения горения в наиболее прогретой точке скопления материала.

Третий показатель, который определяет склонность веществ к тепловому самовозгоранию, – это *удельная поверхность теплоотдачи* $S_{уд}$, которая, в свою очередь, определяется размерами и формой скопления материала. Зная этот показатель, можно в каждом конкретном случае определить безопасные размеры объемов материала и их геометрическую форму для данной температуры среды.

Температуру самонагревания можно считать минимальной температурой, при которой возможно самовозгорание данного материала *при наиболее благоприятных условиях*. Температура тления или температура самовоспламенения это температуры, выше которых самовозгорание возможно даже при неблагоприятных условиях – малые размеры образца, кратковременность нагрева и т.п. В интервале между этими критическими температурами возможность самовозгорания зависит от условий аккумуляции тепла и накопления промежуточных продуктов, которые влияют на скорость процесса окисления. В работе [13] было показано, что в этом интервале температур зависимость температуры среды, при которой возникает самовозгорание, от удельной поверхности теплоотдачи и времени нагрева материала достаточно точно можно выразить эмпирическими формулами:

$$\lg t_c = A_p + n_p \lg S_{уд}, \quad (2.18)$$

$$\lg t_c = A_b - n_b \lg \tau_{инд}, \quad (2.19)$$

где t_c – температура среды, при которой возникает тепловое самовозгорание, °С;
 $S_{уд}$ – удельная поверхность материала, m^{-1} ;
 $\tau_{инд}$ – время теплового воздействия на момент возникновения самовозгорания, ч;
 A_p, n_p, A_b, n_b – эмпирические коэффициенты, определяемые экспериментально для данного горючего вещества; для значительного количества практически важных материалов они приведены в справочниках [7], [33] (для некоторых материалов коэффициенты приведены в таблице 8 приложений).

Удельная поверхность образца определяется как отношение полной поверхности теплоотдачи к объему материала, в котором происходят экзотермические процессы:

$$S_{уд} = \frac{S_{полн}}{V}, m^{-1}, \quad (2.20)$$

где $S_{полн}$ – полная внешняя поверхность образца, m^2 ;
 V – объем образца, m^3 .

Удельную поверхность параллелепипеда можно определить по формуле:

$$S_{уд} = 2\left(\frac{1}{a} + \frac{1}{b} + \frac{1}{h}\right), m^{-1}, \quad (2.21)$$

где a, b, h – размеры образца, м.

Если основание параллелепипеда ($a \cdot b$) теплоизолировано, то удельная поверхность теплоотдачи равняется:

$$S_{уд} = 2\left(\frac{1}{a} + \frac{1}{b}\right) + \frac{1}{h}, m^{-1}. \quad (2.22)$$

Для тела цилиндрической формы удельная поверхность может быть определена как:

$$S_{уд} = 2\left(\frac{1}{H} + \frac{1}{R}\right), m^{-1}, \quad (2.23)$$

где H – высота цилиндра, м;
 R – радиус цилиндра, м.

Если основание цилиндра (πR^2) теплоизолировано, то удельная поверхность теплоотдачи равняется:

$$S_{уд} = \frac{1}{H} + \frac{2}{R}, m^{-1}. \quad (2.24)$$

Для тела конической формы удельная поверхность определяется по формуле:

$$S_{уд} = 3 \frac{R + \sqrt{H^2 + R^2}}{HR}, m^{-1}, \quad (2.25)$$

где H – высота конуса, м;

R – радиус основания конуса, м.

Если основание конуса (πR^2) теплоизолировано, то удельная поверхность теплоотдачи равняется:

$$S_{уд} = 3 \frac{\sqrt{H^2 + R^2}}{HR}, \text{ м}^{-1}. \quad (2.26)$$

Безопасной температурой нагрева образца данного размера в производственном процессе считают температуру, которая не превышает 80 % от критической температуры среды, при которой возникает тепловое самовозгорание:

$$t_{без} = 0,8t_c, \text{ }^\circ\text{C} \quad (2.27)$$

Для определения температуры самонагрева проводятся экспериментальные исследования, в которых образец обозначенных размеров выдерживают в термостате при заданных температурах. При этом проводится контроль температуры внутри образца. За температуру самонагрева принимают минимальную температуру термостата, при которой наблюдается резкое повышение температуры материала, заканчивающееся тлением или пламенным горением.

Если известны коэффициенты формулы (2.18), то это приблизительное значение температуры самонагрева $t_{сн}$ можно рассчитать, допуская величину удельной поверхности образца $S_{уд} = 1 \text{ м}^{-1}$:

$$\lg t_{сн} = A_p \quad (2.28)$$

Аналогично можно рассчитать и температуру тления материала $t_{тл}$, допуская величину удельной поверхности образца $S_{уд} = 150 \text{ м}^{-1}$ (именно такую удельную поверхность имеет образец, используемый для экспериментального определения температуры тления веществ и материалов согласно [30]):

$$\lg t_{тл} = A_p + 2,18n_p. \quad (2.29)$$

Если отсутствуют экспериментальные данные, по которым можно определить эмпирические константы зависимости (2.18), но известны температуры самонагрева и тления, то по уравнениям (2.28) и (2.29) возможно решить обратную задачу – рассчитать константы $A_p = \lg t_{сн}$, $n_p = 0,457 \lg \frac{t_{тл}}{t_{сн}}$ и определить критическую температуру среды, при которой может возникнуть самовозгорание скопления материала данных размеров, по формуле (2.18).

Зная температуру самонагрева веществ и материалов, можно определить условия безопасного продолжительного (постоянного) нагрева веществ.

Безопасной считают температуру постоянного нагрева вещества или материала независимо от размера образца, которая не превышает 90 % температуры самонагрева:

$$t_{\text{без}} = 0,9t_{\text{сн}} \quad (2.30)$$

Используя данные уравнения, можно определить параметры теплового самовозгорания, такие как температура самонагрева, температура тления, время индукции теплового самовозгорания, критическую температуру среды и время нагрева скопления материала заданных размеров.

2.7 Методика определения параметров теплового самовозгорания

1. Определить для данного горючего вещества эмпирические коэффициенты A_p , n_p , A_b , n_b по справочнику [7] или по таблице 8 приложений.

2. Рассчитать температуру самонагрева горючего материала по формуле (2.).

3. Рассчитать температуру тления горючего материала по формуле (2.29).

4. Рассчитать удельную поверхность теплоотдачи в зависимости от формы скопления горючего материала по формуле (2.20).

5. Рассчитать по формулам (2.18) и (2.19) критическую температуру среды и время нагрева скопления горючего материала данных размеров, при которых может возникнуть тепловое самовозгорание.

6. Рассчитать безопасную температуру нагрева горючего материала во время его эксплуатации, формулы (2.27) или (2.28).

2.8 Примеры решения задач

Задача 1. Определить критическую температуру среды и время нагрева, при которых может возникнуть тепловое самовозгорание сосновых опилок в контейнере с размерами $1 \text{ г} \times 1,5 \text{ г} \times 2 \text{ г}$, а также безопасную температуру хранения этого материала. Считать, что все стенки контейнера не теплоизолированы.

Решение

1. Определяем константы теплового самовозгорания для сосновых опилок по таблице 8 приложений:

$$A_p = 1,855; n_p = 0,219; A_b = 2,296; n_b = 0,096.$$

2. Рассчитываем удельную поверхность контейнера данных размеров по формуле (2.):

$$S_{\text{уд}} = 2 \left(\frac{1}{1} + \frac{1}{1,5} + \frac{1}{2} \right) = 4,3 \text{ м}^{-1}.$$

3. Рассчитываем критическую температуру среды и время нагрева контейнера, при которых может возникнуть тепловое самовозгорание, по формулам (2.) и (2.):

$$\lg t_c = 1,855 + 0,219 \lg 4,3 = 1,99, \text{ откуда: } t_c = 10^{1,99} = 98,6 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

$$\lg t_c = 2,296 - 0,096 \lg \tau_{\text{инд}}, \text{ т.е.: } \lg \tau_{\text{инд}} = \frac{2,296 - 1,99}{0,096} = 3,19;$$

$$\tau_{\text{инд}} = 10^{3,19} = 1540 \text{ ч.}$$

4. Определяем температуру безопасного хранения сосновых опилок в контейнере заданного размера по формуле (2.):

$$t_{\text{без}} = 0,8 \cdot 98,6 = 79 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Вывод: при хранении сосновых опилок в контейнере с удельной поверхностью $4,3 \text{ м}^{-1}$ самонагревание возникнет при температуре $98,6 \text{ } ^\circ\text{C}$ и закончится самовозгоранием через 1540 часов. Максимальная безопасная температура при хранении сосновых опилок в заданных условиях равняется $79 \text{ } ^\circ\text{C}$.

Задача 2. Определить критическую температуру среды и время, за которое может возникнуть самовозгорание тюка с хлопком цилиндрической формы размерами $H = 1,8 \text{ м}$, $R = 0,8 \text{ м}$, если известно, что температура самонагревания хлопка $t_{\text{сн}} = 120 \text{ } ^\circ\text{C}$, а температура тления $t_{\text{тл}} = 205 \text{ } ^\circ\text{C}$. Считать, что основание тюка хлопка не теплоизолировано.

Решение

1. Определяем по формулам (2.), (2.) параметры A_p , n_p :

$$A_p = \lg t_{\text{сн}} = \lg 120 = 2,079,$$

$$n_p = 0,4571 \lg \frac{t_{\text{тл}}}{t_{\text{сн}}} = 0,4571 \lg \frac{205}{120} = 0,106.$$

2. Определяем удельную поверхность тюка хлопка, если его основание не теплоизолировано, по формуле (2.):

$$S_{\text{уд}} = 2 \left(\frac{1}{1,8} + \frac{1}{0,8} \right) = 3,6 \text{ м}^{-1}.$$

3. Определяем критическую температуру среды, при которой возможно возникновение самовозгорания тюка хлопка заданных размеров, по формуле (2.18):

$$\lg t_c = 2,079 + 0,106 \lg 3,6 = 2,138$$

$$t_c = 10^{2,138} = 137 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

4. Определяем время до возникновения теплового самовозгорания при температуре среды $137 \text{ } ^\circ\text{C}$ по формуле (2.19), если константы процесса самовозгорания для хлопка по таблице 8 приложения составляют $A_b = 2,332$; $n_b = 0,057$.

$$\lg \tau_{\text{инд}} = \frac{A_b - \lg t_c}{n_b} = \frac{2,332 - 2,138}{0,096} = 2,02;$$

$$\tau_{\text{инд}} = 10^{2,02} = 105 \text{ часов.}$$

5. Определяем максимальную безопасную температуру среды для длительного хранения кипы хлопка заданного размера:

$$t_{\text{без}} = 0,8 \cdot t_c = 0,8 \cdot 137 = 109,6 \text{ }^\circ\text{C}$$

Вывод: при хранении тюка хлопка с удельной поверхностью $3,6 \text{ м}^{-1}$ при температуре среды $137 \text{ }^\circ\text{C}$ через 105 часов возникнет самовозгорание; максимальная безопасная температура при его хранении при заданных условиях – $109,6 \text{ }^\circ\text{C}$.

Задача 3. В технологическом процессе мука кормовая собирается в бункере-накопителе и образует скопление конической формы размерами $H = 1,5 \text{ м}$, $R = 1,9 \text{ м}$. Днище аппарата теплоизолировано. Определить показатели пожарной опасности горючего материала и безопасные условия его хранения. Определить, может ли возникнуть горение, если мука кормовая хранится в бункере-накопителе при температуре $40 \text{ }^\circ\text{C}$ в течении 10 часов.

Решение

1. Определяем константы теплового самовозгорания для муки кормовой по таблице 8 приложений:

$$A_p = 1,507, n_p = 0,322, A_b = 2,103, n_b = 0,244$$

2. Рассчитываем температуру самонагрева муки кормовой по формуле (2.34):

$$\lg t_{\text{сн}} = 1,507; \quad t_{\text{сн}} = 10^{1,507} = 32 \text{ }^\circ\text{C}$$

3. Рассчитываем температуру тления муки кормовой по формуле (2.29):

$$\lg t_{\text{тл}} = 1,507 + 2,18 \cdot 0,322 = 2,209$$

$$t_{\text{тл}} = 10^{2,209} = 162 \text{ }^\circ\text{C}$$

4. Рассчитываем удельную поверхность теплоотдачи по формуле (2.26) для теплоизолированного основания конуса:

$$S_{\text{уд}} = 3 \frac{\sqrt{1,5^2 + 1,9^2}}{1,5 \cdot 1,9} = 2,55 \text{ м}^{-1}$$

5. Рассчитываем по формулам (2.18) и (2.19) критическую температуру среды и время нагрева скопления муки кормовой заданных размеров, инициирующих тепловое самовозгорание:

$$\lg t_c = 1,507 + 0,322 \lg 2,55 = 1,64; \text{ откуда: } t_c = 10^{1,64} = 43,5 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\lg t_c = 2,103 - 0,244 \lg \tau_{\text{инд}}; \text{т.е.: } \lg \tau_{\text{инд}} = \frac{2,103 - 1,638}{0,244} = 1,906$$

$$\tau_{\text{инд}} = 10^{1,906} = 80,5 \text{ часов}$$

6. Рассчитываем безопасную температуру нагрева скопления муки кормовой заданных размеров, формула (2.27):

$$t_{\text{без}} = 0,8 \cdot 43,5 = 34,8 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Безопасная температура продолжительного хранения муки кормовой независимо от размера образца, формула (2.30):

$$t_{\text{без}} = 0,9 \cdot 32 = 28,8 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Вывод: поскольку критическая температура среды и время нагрева, при которых может возникнуть тепловое само-возгорание скопления муки кормовой заданных размеров, больше, чем температура и время хранения материала, горение в бункере-накопителе при данных условиях не возникнет.

2.9. Задачи для самостоятельного решения

Задача 1. Определить склонность к самовозгоранию:

а) масел, которые состоят из смеси триглицеридов карбоновых кислот, представленных в таблице 2.2.

Таблица 2.2. Масла, состоящие из смеси триглицеридов карбоновых кислот

№	Масло (смесь глицеридов кар- боновых кислот)	лауриновая	линолевая	тетрадеценовая	низойная	миристиновая	пальмитиновая	каприловая	стеариновая	линоленовая	олеиновая	гадолеиновая	маргариновая	эруковая
1	масло какао	50				20	23			4	3			
2	пальмоядерная	50	3			20	16			4	5			
3	перилловое		65				5			16	14			
4	подсолнечное		55						10		35			
5	хлопковое		33				17		6		44			
6	конопляное		40							26	16			
7	сливочное	27					17		5		41		10	
8	горчичное		20				4				28			48
9	китовый жир			15	17		25				36	32		
10	свиной жир		7				30		18	3	42			
11	говяжий жир		2	3			31		23		41			
12	бараний жир		5			3	24		32		36			
13	кунжутное		40				8		6		45			
14	кукурузное		50			6					40		4	
15	кокосовое	47		1	17		20			1	8			
16	пальмовое			2			40			8	50			
17	тунговое		2							10	6			
18	ойтисиковое		1				11				6	80		
19	льняное		33				10			45	12			
20	соевое		52			5	10			8	25			

Задача 2. Рассчитать возможность возникновения химического самовозгорания при контакте с водой технического продукта заданного состава при условиях, приведенных в таблице (масса исходного продукта, избыток воды, начальная температура и тепловой эффект реакции взаимодействия исходных компонентов с водой). Теплоемкости газообразных горючих и твердых негорючих продуктов реакции предоставлены в дополнительной таблице 2.3.

Таблица 2.3. Теплоемкости газообразных горючих и твердых негорючих продуктов реакции

№ варианта	техническое название продукта	масса, кг	состав продукта		избыток воды, %	тепловой эффект реакции, кДж·моль ⁻¹	начальная температура, °С
			вещество	содержание, мас. %			
1	карбид кальция	3,0	CaC ₂ CaO	80 15	15	125,5 65,3	20
2	карбид кальция	4,0	CaC ₂ CaO	75 23	40	125,5 65,3	25
3	карбид кальция	5,0	CaC ₂ CaO	78 20	25	125,5 65,3	30
4	карбид стронция	2,5	SrC ₂ SrO	85 13	50	145,8 79,76	35
5	карбид бария	3,0	BaC ₂ BaO	90 8	45	171,30 104,1	40
6	карбид бария	1,0	BaC ₂ BaO	87 10	20	171,3 104,1	45
7	карбид бария	3,5	BaC ₂ BaO	92 5	35	171,3 104,1	50
8	нитрид кальция	1,5	Ca ₃ N ₂ CaO	98 2	10	902 65,3	30
9	нитрид кальция	2,0	Ca ₃ N ₂ CaO	97 2	45	902 65,3	35
10	нитрид кальция	5,0	Ca ₃ N ₂ CaO	95 3	50	902 64,2	25
11	нитрид стронция	1,0	Sr ₃ N ₂ SrO	90 5	45	891 79,8	20
12	нитрид бария	4,5	Ba ₃ N ₂ BaO	89 7	60	891 104,1	30
13	нитрид бария	3,0	Ba ₃ N ₂ BaO	91 5	55	891 104,1	25
14	нитрид магния	2,0	Mg ₃ N ₂ MgO	90 7	20	689,2 36,9	15
15	гидрид кальция	1,5	CaH ₂ CaO	98 1	35	218,55 65,3	35
16	гидрид кальция	2,0	CaH ₂ CaO	95 3	20	218,55 65,3	20
17	гидрид стронция	1,0	SrH ₂ SrO	97 2	25	209,47 79,8	10
18	гидрид стронция	3,5	SrH ₂ SrO	95 4	35	209,47 79,8	15
19	гидрид бария	5,0	BaH ₂ BaO	87 7	30	200,45 104,1	25
20	гидрид бария	4,0	BaH ₂ BaO	79 11	20	200,45 104,1	30

Изобарная удельная массовая теплоемкость некоторых веществ при стандартных условиях показана в таблице 2.4:

Таблица 2.4. Изобарная удельная массовая теплоемкость

№	Вещество	Теплоемкость c_p , Дж·кг ⁻¹ ·К ⁻¹
1	Mg(OH) ₂	1,33
2	Ca(OH) ₂	1,18
3	Sr(OH) ₂	0,78
4	Ba(OH) ₂	0,57
5	C ₂ H ₂	1,69
6	NH ₃	2,09
7	H ₂	14,4

Задача 3. Для веществ, приведенных в таблицах 2.5 – 2.10, рассчитать:

- температуру самонагрева;
- температуру тления;
- безопасную температуру длительного нагревания;
- критическую температуру среды и время индукции до возникновения теплового самовозгорания при хранении вещества в контейнере с приведенными размерами:

а) контейнер в виде параллелепипеда (табл.2.5):

Таблица 2.5. Данные для задачи 3,а:

№	Название вещества или материала	a, м	b, м	h, м
1	хлопок	0,5	1,2	1,5
2	хлопок объемный 2-й сорт	1,5	0,8	1,1
3.	Краситель 4,8-диамино 1,5-диоксиатрахион	0,7	1,4	0,4
4	картон кровельный	1,3	1,7	1,0
5	краситель азокраситель ярко-красный	0,7	0,4	0,8
6	плита деревоволокнистая изоляционная	1,1	0,9	0,8
7	краситель дисперсный бордо 2С	2,0	1,0	1,8
8	краситель дисперсный фиолетовый 4К	1,2	1,5	1,4
9	плита деревоволокнистая полутвердая	2,5	3,0	1,2
10	краситель дисперсный красно-коричневый	2,1	2,8	2,0

б) контейнер в виде параллелепипеда с теплоизолированным основанием (табл. 2.6):

Таблица 2.6. Данные для задачи 3,б:

№	Название вещества или материала	a, м	b, м	h, м
1	краситель диспергатор НФ	3,2	2,5	3,5
2	краситель зеленый пигмент	2,0	0,2	1,0
3	плита минераловатная	1,6	2,6	2,0
4	плита торфяная	1,4	2,3	1,9
5	краситель кубазол „Серый С,,	3,0	4,0	3,5
6	опилки сосновые	1,3	3,2	2,1
7	краситель цианол голубой 4 „3,,	0,6	1,2	0,9
8	битум нефтяной окисленный	4,0	6,0	2,0
9	брикетированная травяная резка	5,0	4,5	4,0
10	витамин В ₂	1,2	1,3	1,4

в) контейнер цилиндрической формы (табл. 2.7):

Таблица 2.7. Данные для задачи 3,в:

№	Название вещества или материала	d, м	h, м
1	гипсотермин в виде крошки	1,5	1,1
2	гудрон нефтяной	1,9	2,6
3	дермантин	2,1	2,5
4	дрожжи кормовые	1,5	1,8
5	удобрение для теплиц	2,0	1,2
6	изип (бактериальный препарат)	4,3	3,1
7	ионообменная смола СГ № 30 (порошок)	3,8	3,0
8	краситель азокпигмент бордо ЖВ	3,3	2,6
9	нитроаммофоска НАФК КОА (1:1:1)	3,6	1,5
10	краситель дисперсный красный Ж (6 %)	4,0	2,2

г) контейнер цилиндрической формы с теплоизолированным основанием цилиндра (табл. 2.8):

Таблица 2.8. Данные для задачи 3,г:

№	Название вещества или материала	d, м	h, м
1	ледерин (кожзаменитель)	4,1	2,5
2	табак неферментированный краснодарский	2,6	3,6
3	мука витаминная из листьев	0,5	2,4
4	мука витаминная хвойная	0,8	1,5
5	мука ржаная	1,5	2,2
6	мука шламовая фосфорная	2,4	3,9
7	нитроаммофос НАФ, марка А (1:1)	1,5	1,5
8	нитроаммофоска НАФК, марка А (1:1:1)	1,4	2,5
9	нитроаммофоска с мочевиной	2,5	1,5
10	краситель бутиловый ксантогенат калия	2,5	2,0

д) контейнер конической формы (табл. 2.9):

Таблица 2.9. Данные для задачи 3,д:

№	Название вещества или материала	d, м	h, м
1	кордная пыль	4,5	2,2
2	силос	7,4	4,6
3	сено	5,6	3,4
4	сланцевая пыль	1,5	1,1
5	солома пшеницы	3,8	2,8
6	опилки сосновые	1,7	2,6
7	тизолин	2,9	1,0
8	товарные дрожжи, влажность 8 %	4,2	3,1
9	торф	2,3	2,5
10	торф фрезерный	1,5	1,6

е) контейнер конической формы с теплоизолированным основанием конуса (табл. 2.10):

Таблица 2.10. Данные для задачи 3,е:

№	Название вещества или материала	d, м	h, м
1	цинеб 80 %	2,5	1,3
2	полилак	3,4	1,2
3	шевелин	1,2	0,5
4	кормарин	2,5	1,5
5	краситель кислотный зеленый (30 %)	3,5	0,5
6	моющее средство „Лотос-7,,	3,0	1,5
7	мука кормовая	2,6	1,0
8	катализатор К-14	0,8	0,5
9	краситель азоксипигмент красный 4ЖВ (40 %)	1,5	0,8
10	табак ферментированный краснодарский (2-й сорт)	2,3	1,8

Задача 4. Для материалов, представленных в таблице 2.11, определить, может ли возникнуть горение, если материал в виде скопления заданной формы хранится в технологическом оборудовании при фактической температуре $t_{\text{факт}}$, °С а течении времени $\tau_{\text{нагр}}$, указанного в таблице. Определить безопасную температуру хранения скопления материала заданных размеров.

а) контейнер в виде параллелепипеда (табл.2.11):

Таблица 2.11. Данные для задачи 4,а:

№	Название материала	a, м	b, м	h, м	$t_{\text{факт}},$ °C	$\tau_{\text{нагр}},$ Ч.
1	уголь активированный АП-14	4,0	5,0	3,0	120	5
2	уголь активированный марки Б	3,5	7,0	4,0	80	12
3	войлок строительный	1,7	3,0	2,0	75	100
4	войлок минеральный битумный	2,7	3,3	4,1	100	50
5	гранитоль	1,4	0,9	1,9	150	24

б) контейнер цилиндрической формы (табл. 2.12):

Таблица 2.12. Данные для задачи 4,б:

№	Название материала	d, м	h, м	$t_{\text{факт}},$ °C	$\tau_{\text{нагр}},$ Ч.
1	полилак	3	2,5	100	25
2	шевелин	1,7	2,3	120	7
3	кормогрезин 10	0,5	3	90	30
4	полимицин	2,2	1,9	60	48
5	препарат № 30 «М» на хлопке (1:1)	1,8	1,2	95	10

в) контейнер конической формы (табл. 2.13):

Таблица 2.13. Данные для задачи 4,в:

№	Название материала	d, м	h, м	$t_{\text{ф}},$ °C	$\tau_{\text{нагр}},$ Ч
1	краситель нигрозин спирторастворимый	3,4	2,5	60	12
2	фитобактериомицин	3,7	1,7	95	100
3	целолигнин карбонизированный ЦБК	4,0	2,3	120	8
4	цинеб 80 % в смеси с ТНТД-80 (17:3)	2,5	4,7	80	5
5	табак ферментированный краснодарский 2с	3,0	2,8	85	50

Задача 5. Для материалов, представленных в таблице, рассчитать минимальную температуру среды, при которой они могут самовозгораться при хранении в контейнере с приведенными в таблице размерами, если известны температура самонагрева $t_{\text{сн}}$ и температура тления $t_{\text{мл}}$ материала. Определить безопасные температуры длительного хранения материала и хранения скопления материала данных размеров.

Таблица 2.14. Данные для задачи 5:

№	Материал	$t_{сн},$ °C	$t_{тл},$ °C	Размеры контейнера		
				a, м	b, м	h, м
1.	хлопок	120	205	0,6	1,6	0,8
2.	хлопок	120	205	1,2	1,8	2,0
3.	хлопок сырец	60	190	0,8	1,8	0,9
4.	хлопок сырец	60	190	0,6	2,2	2,5
5.	мука витаминная из листьев	95	170	0,5	0,8	1,5
6.	мука витаминная из листьев	95	170	1,8	0,9	0,4
7.	мука витаминная хвойная	60	190	0,8	0,6	0,7
8.	мука витаминная хвойная	60	190	1,1	1,2	1,3
9.	мука кормовая	35	170	1,0	1,2	1,4
10.	мука кормовая	35	170	1,5	2,0	2,5
11.	уголь бурый	50	150	0,5	1,0	1,5
12.	уголь бурый	65	250	1,5	2,0	2,5
13.	бумага фотографическая	120	324	1,0	2,0	3,0
14.	опилки дубовые	100	229	1,0	0,8	0,6
15.	опилки сосновые	80	230	1,5	1,3	1,1
16.	опилки сосновые	80	230	0,9	2,0	1,5
17.	опилки еловые	100	220	1,5	1,2	0,9
18.	опилки еловые	100	220	1,5	1,8	2,1
19.	табак ферментированный	70	210	2,1	2,0	0,5
20.	табак ферментированный	70	210	0,8	1,2	1,9

Глава 3. Вынужденное зажигание

Вынужденное зажигание – это возникновение горения вследствие действия источника зажигания на малую долю холодной горючей смеси [1] – [3], [5], [10].

На производстве, в котором используются горючие вещества в атмосфере окислителя (воздух), горючая среда имеется постоянно, поэтому, для предупреждения возникновения горения необходимо исключить возможность возникновения именно источника зажигания.

Источник зажигания – это горящее или раскаленное тело, а также электрический разряд, которые имеют энергию и температуру, достаточные для зажигания (возникновения горения) других веществ.

В зависимости от происхождения, источники зажигания классифицируют на группы:

- тепловые проявления электрической энергии;
- тепловые проявления механической энергии;
- открытое пламя, раскаленные продукты горения и нагретые ими поверхности;
- тепловые проявления ядерной энергии, энергия солнечных лучей;
- тепловые проявления химических реакций (из этой группы в самостоятельную группу выделены пламя и продукты горения).

Безусловными источниками зажигания являются прямые удары молнии, мощные электрические дуги, пламя газовых горелок.

При проведении экспертизы пожара, особенно при определении вероятных источников зажигания, необходимо знать причины и условия зажигания определенных веществ теми или другими тепловыми проявлениями [25].

3.1 Определение способности электрических разрядов к зажиганию

Почти 25 % всех пожаров возникает из-за тепловых проявлений электрической энергии, основные среди которых – короткие замыкания (43 %), перегрев горючих материалов, находящихся возле оставленных без надзора электронагревательных приборов, (33 %), токовые перегрузки (12 %), искрение и электрические дуги (3 %), большие переходные сопротивления (5 %) и другие причины (4 %).

При зажигании горючей системы электрическим разрядом, параметром пожароопасности системы является предельное наименьшее значение энергии электрического разряда E_{min} , начиная с которого смесь способна загораться с дальнейшим распространением пламени на весь объем [5], [8], [10].

Минимальной энергией зажигания E_{min} газа, пара, аэрозоля данного вещества в воздухе называют наименьшую энергию электрического конденсатора, при разряде которого через воздушный промежуток возникает искра, зажигающая стехиометрическую смесь данного вещества с воздухом с вероятностью 0,01.

Горение возникнет, если энергия электрического разряда $E_{эл.р}$ прогреет определенный объем горючей смеси, расположенный в холодной горючей сре-

де, от T_0 до $T_{гор}$. Расчеты показывают, что такой объем приобретает свойства незатухающего элемента пламени в случае, когда его размеры имеют порядок ширины фронта пламени $\delta_{фп}$ ($r_{min} = 3,7\delta_{фп}$).

Соотношение между критическим количеством тепла, необходимого для зажигания сферического объема горючей смеси с критическим размером r_{min} , и минимальной энергией электрической искры можно выразить в виде:

$$E_{min} \sim \frac{\lambda^3(T_{гор} - T_0)}{u_n^3 \rho^2 c_p^2}, \quad (3.1)$$

где λ – коэффициент теплопроводности горючей смеси;
 c_p – теплоемкость горючей смеси при постоянном давлении;
 ρ – плотность горючей смеси;
 u_n – нормальная скорость распространения пламени;
 T_0 – начальная температура горючей смеси;
 $T_{гор}$ – температура горения смеси.

Если энергия электрического разряда меньше, чем E_{min} , то необходимый объем газовой среды, нагретый до критической температуры, не образуется из-за того, что тепловыделение химической реакции в таком объеме меньше теплоотдачи в холодную смесь. Горючая среда при этом будет интенсивно охлаждаться, и реакция, которая началась в месте действия электрического разряда, прекратится.

Расчет минимальной энергии зажигания горючего вещества возможен на основе сравнительного метода с использованием такого параметра как нормальная скорость распространения горения по соотношению:

$$\frac{E_{min_1}}{E_{min_2}} = \frac{u_{n_2}^2}{u_{n_1}^2}, \quad (3.2)$$

где E_{min_1} , E_{min_2} – минимальная энергия зажигания веществ 1 и 2, соответственно;
 u_{n_1} , u_{n_2} – нормальная скорость распространения горения веществ 1 и 2, соответственно.

Эта формула тем точнее, чем ближе по строению сравниваемые вещества. Как стандартное вещество принято использовать нормальный бутан, у которого $E_{min} = 0,25$ мДж, а $u_n = 0,379$ м·с⁻¹, тогда минимальную энергию зажигания других газов и паров в воздухе при стандартных условиях можно рассчитать по формуле:

$$E_{min} = \frac{0,036}{u_n^2}, \text{ мДж}, \quad (3.3)$$

где u_n – нормальная скорость распространения пламени, м·с⁻¹.

Если скорость распространения горения u_n неизвестна, то минимальную энергию зажигания определяют экспериментально при помощи достаточно

сложного оборудования [30]. Значения минимальной энергии зажигания некоторых веществ приведены в таблицах 10, 11 приложений.

Для ориентировочного расчета E_{\min} паров и газов в воздухе можно использовать значение критического диаметра трубки $d_{кр}$ (критического зазора), при котором не возможно распространение пламени в горючей смеси, по формуле:

$$E_{\min} = \frac{\pi}{6} d_{кр}^3 q_{гс}, \text{ Дж}, \quad (3.4)$$

где $d_{кр}$ – величина критического зазора, м;

$q_{гс}$ – удельное количество тепла, необходимое для нагревания горючей смеси от начальной температуры до температуры самовоспламенения, $\text{Дж}\cdot\text{м}^{-3}$

Из-за незначительного содержания горючего вещества в стехиометрической смеси с воздухом (такую смесь легче поджечь), удельное количество тепла, необходимое для нагревания горючей смеси от начальной температуры до температуре самовоспламенения, рассчитывают как тепло, которое расходуется на такое самое нагревание воздуха:

$$q_{гс} = q_{в}. \quad (3.5)$$

Значение $q_{в}$ можно рассчитать по формуле:

$$q_{в} = \int_{t_{нач}}^{t_{св}} c_{p_{в}}'' dt, \text{ Дж}\cdot\text{м}^{-3}, \quad (3.6)$$

где $c_{p_{в}}''$ - изобарная удельная объемная теплоемкость воздуха, $\text{Дж}\cdot\text{м}^{-3}\cdot\text{К}^{-1}$.

Для того чтобы рассчитать тепло $q_{в}$, расходуемое на нагрев воздуха, необходимо учесть зависимость изобарной удельной объемной теплоемкости от температуры и влажности воздуха или воспользоваться данными, приведенными в табл. 2.7. Математическая обработка данных, представленных в табл. 2.7, позволяет получить аппроксимационную зависимость объемной теплоемкости влажного воздуха от температуры (см. рис. 3.1) в виде формулы:

$$c_{p_{в}}'' = 173,8T^{-0,88}, \text{ кДж}\cdot\text{м}^{-3}\cdot\text{К}^{-1} \quad (3.7)$$

Тогда уравнение (3.6) с учетом (3.7) примет вид:

$$q_{в} = \int_{T_{нач}}^{T_{св}} c_{p_{в}}'' dT = 1,45 \cdot 10^6 (T_{св}^{0,12} - T_{нач}^{0,12}), \text{ Дж}\cdot\text{м}^{-3} \quad (3.8)$$

Таблица 3.1. Зависимость объемной теплоемкости от температуры для влажного воздуха и тепла, расходуемых на нагрев 1 м³ воздуха от 20 °С.

t, °С	c _{рв} ^{''} , Дж·м ⁻³ ·К ⁻¹	q _в , кДж·м ⁻³	t, °С	c _{рв} ^{''} , Дж·м ⁻³ ·К ⁻¹	q _в , кДж·м ⁻³
20	1211		200	765	169,1
30	1171	11,9	250	700	204
40	1134	23,4	300	644	236,3
50	1098	34,6	350	600	266,3
60	1055	45,4	400	560	294,3
70	1034	55,8	500	501	344,4
80	1009	66,2	600	450	384,4
90	977	75,9	700	411	430,5
100	955	85,56	800	380	468,5
120	906	103,6	900	353	503,8
140	865	121,3	1000	328	536,6
160	829	137,9	1100	308	567,4
180	796	153,8	1200	290	596,4

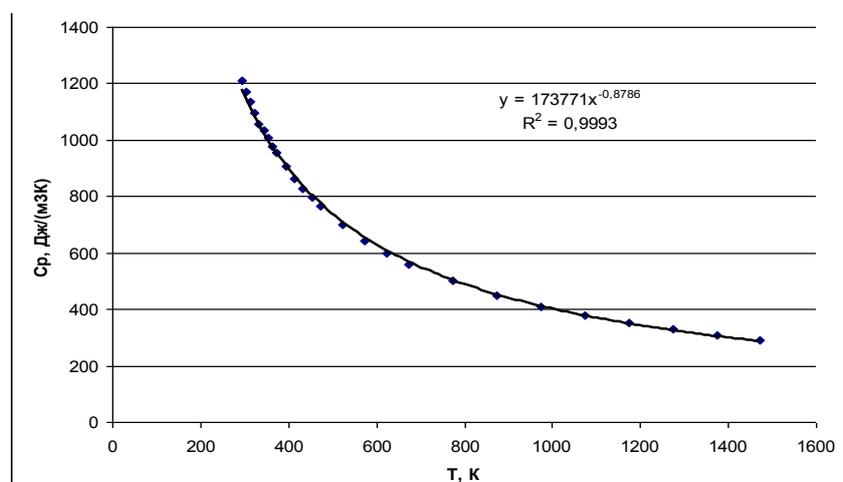


Рис. 3.1 – Зависимость объемной теплоемкости влажного воздуха от температуры

Значение минимальной энергии зажигания используют при разработке мер по обеспечению взрывобезопасных условий переработки горючих веществ и электростатической безопасности технологических процессов соответственно требованиям [31]. Безопасным считают разряд электричества, который имеет энергию, меньше, чем 40 % E_{min}:

$$E_{\text{без}} = 0,4E_{\text{min}} \quad (3.9)$$

3.2 Методика расчета минимальной энергии зажигания

1. Для горючего вещества по справочнику [7] или таблице 11 приложений определить нормальную скорость распространения горения u_n и рассчитать минимальную энергию зажигания горючего вещества в воздухе по формуле (3.3)).

При отсутствии значения u_n , по справочнику [7] для данного горючего вещества определить величину критического зазора $d_{кр}$ ($d_{кр} = 2 \cdot \text{БЭМЗ}$, где БЭМЗ – безопасный экспериментальный максимальный зазор) и температуру самовоспламенения $t_{св}$.

2. Рассчитать тепло, расходуемое на нагрев воздуха от начальной температуры до температуры самовоспламенения, по формуле (3.8).

3. Рассчитать минимальную энергию зажигания горючего вещества в воздухе по формуле (3.4).

4. Рассчитать безопасную энергию разряда электричества по формуле (3.9).

3.3 Примеры решения задач

Задача 1. Рассчитать безопасную энергию разряда статического электричества в технологическом процессе, в котором используется паровоздушная смесь метилового спирта. Сравнить рассчитанное значение энергии зажигания с экспериментально определенной величиной $E_{\min} = 0,14$ мДж.

Решение

1. Определяем по справочнику [7] нормальную скорость распространения горения метилового спирта: $u_n = 0,572 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$.

2. Рассчитываем минимальную энергию зажигания метилового спирта в воздухе по формуле (3.3):

$$E_{\min} = \frac{0,036}{0,572^2} = 0,11 \text{ мДж.}$$

3. Рассчитываем безопасную энергию разряда статического электричества в технологическом процессе, в котором обращается воздушная смесь метанола, по формуле (3.9):

$$E_{\text{без}} = 0,4 \cdot 0,11 = 0,044 \text{ мДж.}$$

4. Определяем погрешность расчета:

$$\Delta = \frac{0,14 - 0,11}{0,14} 100\% = 21,4 \%$$

Вывод: безопасная энергия статического разряда при использовании метилового спирта – меньше, чем 0,044 мДж.

Задача 2. Рассчитать минимальные энергии зажигания воздушных смесей тетрагидрофурана и бутилхлорида при стандартных условиях (начальная температура 25 °С) и при начальной температуре исходной смеси 70 °С. Определить безопасные энергии разряда электричества для данных смесей.

Решение

1. Определяем по справочнику [7] для тетрагидрофурана и бутилхлорида безопасный экспериментальный максимальный зазор и температуру самовоспламенения:

1) тетрагидрофуран C_4H_8O :

$$\text{БЭМЗ} = 0,87 \text{ мм} = 0,87 \cdot 10^{-3} \text{ м}, \quad t_{\text{св}} = 250 \text{ °С} = 523 \text{ К};$$

2) бутилхлорид C_4H_9Cl :

$$\text{БЭМЗ} = 1,06 \text{ мм} = 1,06 \cdot 10^{-3} \text{ м}, \quad t_{\text{св}} = 460 \text{ °С} = 733 \text{ К}.$$

2. Рассчитываем тепло, которое тратится на нагрев воздуха от начальной температуры до температуры самовоспламенения, по формуле (3.8):

$$q_{\text{в}C_4H_8O}^{25} = 1,45 \cdot 10^6 (523^{0,12} - 298^{0,12}) = 0,20 \cdot 10^6 \text{ Дж} \cdot \text{м}^{-3};$$

$$q_{\text{в}C_4H_8O}^{70} = 1,45 \cdot 10^6 (523^{0,12} - 343^{0,12}) = 0,15 \cdot 10^6 \text{ Дж} \cdot \text{м}^{-3};$$

$$q_{\text{в}C_4H_9Cl}^{25} = 1,45 \cdot 10^6 (733^{0,12} - 298^{0,12}) = 0,33 \cdot 10^6 \text{ Дж} \cdot \text{м}^{-3};$$

$$q_{\text{в}C_4H_9Cl}^{70} = 1,45 \cdot 10^6 (733^{0,12} - 343^{0,12}) = 0,28 \cdot 10^6 \text{ Дж} \cdot \text{м}^{-3}.$$

3. Рассчитываем минимальную энергию зажигания смесей горючих веществ в воздухе по формуле (3.4):

$$E_{\text{min}C_4H_8O}^{25} = 0,5 \cdot 0,20 \cdot 10^6 \cdot (0,87 \cdot 2 \cdot 10^{-3})^3 = 0,53 \cdot 10^{-3} \text{ Дж};$$

$$E_{\text{min}C_4H_8O}^{70} = 0,5 \cdot 0,15 \cdot 10^6 \cdot (0,87 \cdot 2 \cdot 10^{-3})^3 = 0,39 \cdot 10^{-3} \text{ Дж};$$

$$E_{\text{min}C_4H_9Cl}^{25} = 0,5 \cdot 0,33 \cdot 10^6 \cdot (1,06 \cdot 2 \cdot 10^{-3})^3 = 1,57 \cdot 10^{-3} \text{ Дж};$$

$$E_{\text{min}C_4H_9Cl}^{70} = 0,5 \cdot 0,28 \cdot 10^6 \cdot (1,06 \cdot 2 \cdot 10^{-3})^3 = 1,33 \cdot 10^{-3} \text{ Дж}.$$

4. Рассчитываем безопасную энергию разряда электричества по формуле (3.9):

$$E_{\text{без}C_4H_8O}^{25} = 0,4 \cdot 0,53 \cdot 10^{-3} = 0,21 \cdot 10^{-3} \text{ Дж};$$

$$E_{\text{без}C_4H_8O}^{70} = 0,4 \cdot 0,39 \cdot 10^{-3} = 0,16 \cdot 10^{-3} \text{ Дж};$$

$$E_{\text{без}C_4H_9Cl}^{25} = 0,4 \cdot 1,57 \cdot 10^{-3} = 0,63 \cdot 10^{-3} \text{ Дж};$$

$$E_{\text{без}C_4H_9Cl}^{70} = 0,4 \cdot 1,33 \cdot 10^{-3} = 0,53 \cdot 10^{-3} \text{ Дж}.$$

Вывод: рассчитаны минимальные энергии зажигания воздушных смесей тетрагидрофурана и бутилхлорида при стандартных условиях равняются соответственно 0,53 мДж и 1,57 мДж, что отличается от экспериментальных значений со-

ответственно на 1,8 % ($E_{\min} \text{C}_4\text{H}_8\text{O} = 0,54 \text{ мДж}$) и на 26,6 % ($E_{\min} \text{C}_4\text{H}_9\text{Cl} = 1,24 \text{ мДж}$). При условии повышения начальной температуры горючих смесей их минимальная энергия зажигания уменьшается.

3.4 Определение способности раскаленных тел к зажиганию

Очень часто в технологических процессах производства источником зажигания служат раскаленные тела, нагретые до температуры, достаточной для поджигания других горючих веществ и материалов [1], [3], [11], [25].

Температура зажигания – это критическая температура нагретого тела, при которой достигается равновесие между тепловыделением при окислении горючего вещества в пристенном слое горючей смеси и теплоотдачей в окружающую холодную смесь [26].

Раскаленные тела могут возникать при нагреве частей технологического оборудования или конструкций открытым пламенем, при тепловых проявлениях механической энергии (появление внутри горючей среды фрикционных искр, представляющих собой кусочки металла, оторванные, нагретые и частично окисленные при механическом ударе, поверхностей, нагретых вследствие трения), тепловых проявлений электрической энергии (нагретые поверхности ламп накаливания, раскаленные капли металла, образующиеся при электросварочных работах, короткого замыкания и т.п.). Источником зажигания могут служить также раскаленные продукты горения – искры топок и двигателей.

Зажигание газозвушной смеси раскаленным телом с формой металлического шара радиусом r возможно, если:

$$r_{\text{дз}} \geq \sqrt{\frac{E_{\text{акт}} \lambda (T_{\text{зап}} - T_0)^2}{2Q_{\text{н}} \omega_{\text{хр}} R T_{\text{зап}}^2}}, \quad (3.10)$$

где $E_{\text{акт}}$ – энергия активации реакции горения;
 λ – коэффициент теплопроводности газовой смеси;
 $T_{\text{заж}}$ – температура зажигания;
 T_0 – начальная температура газовой смеси;
 $Q_{\text{н}}$ – низшая теплота сгорания горючего вещества;
 R – универсальная газовая постоянная;
 $\omega_{\text{хр}}$ – скорость химической реакции окисления.

Температура зажигания (температура раскаленного тела) должна обеспечить необходимый начальный запас тепла в прогретом слое горючего газа [26].

На $T_{\text{заж}}$ влияют факторы, которые характеризуют:

1) вид горючего вещества:

- теплотворная способность ($Q_{\text{н}} \uparrow T_{\text{заж}} \downarrow$);
- агрегатное состояние (наименьшая $T_{\text{заж}}$ у горючих газов, наибольшая – у твердых горючих материалов);

2) состав горючей смеси:

- концентрация кислорода в окислительной среде ($\varphi_{O_2} \uparrow T_{зж} \downarrow$);
- примеси негорючих газов ($\varphi_{нг} \uparrow T_{зж} \uparrow$);
- концентрация горючего вещества ($\varphi_{гв} = \varphi_{стм}, T_{зж_{мин}}$);

3) условия, в которых находится горючая смесь:

- начальная температура смеси ($T_0 \uparrow T_{зж} \downarrow$);
- давление, под которой находится горючая смесь ($P \uparrow T_{зж} \downarrow$);
- скорость движения газовой смеси ($v_{движ} \uparrow T_{зж} \uparrow$);

4) свойства самого источника зажигания:

- теплоемкость материала ($c_p \downarrow T_{зж} \uparrow$);
- размеры нагретого тела ($d_{из} \uparrow T_{зж} \downarrow$);
- общая площадь поверхности нагретых тел ($S \downarrow T_{зж} \uparrow$).

При увеличении времени контакта источника зажигания с горючей системой температура зажигания снижается до температуры самовоспламенения.

Искры разного происхождения имеют разные начальные температуры и характерные размеры (табл. 3.2).

Таблица 3.2. Характерные температура и диаметр искр разного происхождения

Происхождение искры	Температура искры, °С	Диаметр искры, мм
электросварочных работ	4000	5
короткого замыкания электропроводки	2500	3
механического происхождения	$t_{пл.}$ более легкоплавкого металла	0,5÷1

Теплофизические характеристики металлов, которые наиболее распространены в технике, приведены в таблице 3.3.

Таблица 3.3. Физические константы некоторых металлов

Металл	$t_{пл}, ^\circ\text{C}$	$\Delta H_{кр}, \text{кДж} \cdot \text{кг}^{-1}$	$\lambda, \text{Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$	$c_p, \text{Дж} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$	$\rho, \text{кг} \cdot \text{м}^{-3}$
чугун	1200	225	52	420	7270
сталь	1375	318	58	678	7860
железо	1539	277	67,5	577	7600
алюминий	660	397	210	1140	2550
медь	1083	205	396	456	8700

Исходя из достаточно больших начальных температур *фрикционных искр* или *капель расплавленного металла*, образующихся при электросварочных работах или короткого замыкания электропроводки, можно было бы предполо-

жить, что они могут зажечь любые горючие системы, но на практике это происходит не всегда, а только в тех случаях, когда искра, которая образовалась, имеет достаточный запас энергии.

Зажигательная способность фрикционных искр зависит от химического состава материалов, которые принимают участие в трении, от режима их механического взаимодействия и от свойств горючей системы, в которой может возникнуть искра.

Способность искр разного происхождения к зажиганию определяют по стандарту [31]. Определение вероятности зажигания раскаленными телами сводится к сравнению количества тепла, которое отдается искрой для нагрева горючей смеси от начальной температуры до температуры самовоспламенения, с минимальной энергией зажигания данной горючей системы.

Запас энергии искры $E_{и}$ зависит от ее массы (определяется размером $d_{и}$ и плотностью металла), а также от температуры, с которой искра попадает в горючую среду. Количество тепла, отдаваемое накаленной искрой горючей системе, определяют из уравнения:

$$E_{и} = m_{и}c_p(T_{и} - T_{св}), \quad (3.11)$$

где $m_{и}$ – масса искры;

c_p – теплоемкость металла, из которого образовалась искра;

$T_{и}$ – температура искры, с которой она попадает в горючую среду;

$T_{св}$ – температура самовоспламенения горючего вещества.

На практике геометрические размеры раскаленных капель определяются исследовательским путем. При невозможности практического определения размеров капель допускается принимать их соответственно табл. 2.8.

Для определения температуры, с которой искра попадает в горючую среду, необходимо учитывать, что прежде чем попасть в горючую смесь, искра при прохождении через холодную окружающую среду будет остывать за счет конвекционной теплоотдачи. Степень охлаждения искры определяется общим временем ее полета, теплофизическими характеристиками металла и условиями теплообмена.

Время полета искры зависит от ее скорости и траектории полета. Если рассматривать свободное падение искры, то время полета искры равняется:

$$\tau_{пол} = \frac{H}{v_{и}} = \frac{H}{0,5\sqrt{2gH}}, \quad (3.12)$$

где H – расстояние, которое пролетает искра к моменту попадания в горючую смесь;

$v_{и} = 0,5\sqrt{2gH}$ – средняя скорость полета искры ;

g – ускорение свободного падения.

Коэффициент конвекционной теплоотдачи при движении сферического тела в воздухе определяют по формуле 3.13:

$$\alpha_k = \text{Nu} \frac{\lambda_B}{d_n} = 0,62 \sqrt{\text{Re}} \frac{\lambda_B}{d_n}, \quad (3.13)$$

где Nu – критерий Нуссельта;

$\lambda_B = 22 \cdot 10^{-3} \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$ – коэффициент теплопроводности воздуха;

d_n – диаметр искры, м;

$\text{Re} = \frac{v_n d_n}{\nu_B}$ – число Рейнольдса;

$\nu_B = 15,1 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$ – коэффициент кинематической вязкости воздуха при температуре 20 °С.

После подстановки численных значений коэффициент конвекционной теплоотдачи можно определить по формуле:

$$\alpha_k = 3,52 \sqrt{\frac{v_n}{d_n}}, \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{К}^{-1}. \quad (3.13)$$

Если принять, что в момент образования искры металл находится в расплавленном состоянии, то во время полета будут проходить процессы охлаждения искры от начальной температуры до температуры кристаллизации (плавления), затем – процесс фазового перехода, кристаллизации, после чего происходит остывание уже твердой искры.

Время, которое искра находится в расплавленном состоянии, можно определить по формуле:

$$\tau_{\text{распл}} = \frac{c_p^{\text{распл}} m_n}{\alpha_k S_n} \ln \frac{T_{\text{нач}} - T_0}{T_{\text{пл}} - T_0}, \text{ с}, \quad (3.14)$$

где S_n – площадь поверхности искры, м^2 ; для искры сферической формы $S_n = \pi d^2$;

$c_p^{\text{распл}}$ – удельная теплоемкость искры в расплавленном состоянии, $\text{Дж} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$;

$T_{\text{нач}}$ – начальная температура искры, К;

$T_{\text{пл}}$ – температура плавления искры, К;

T_0 – температура воздуха, К.

Время, за которое состоится кристаллизация, равняется:

$$\tau_{\text{кр}} = \frac{m_n \Delta H_{\text{пл}}}{\alpha_k S_n (T_{\text{пл}} - T_0)}, \text{ с}, \quad (3.15)$$

где $\Delta H_{\text{пл}}$ – удельная теплота плавления, $\text{Дж} \cdot \text{кг}^{-1}$.

Изменение температуры искры во времени представлено на графике (рис. 2.2).

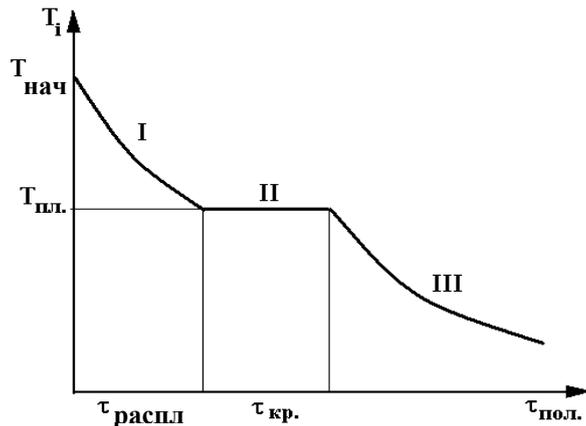


Рис. 3.2. Изменение температуры искры $T_{и}$ (капли расплавленного металла) со временем полета $\tau_{пол}$:

- I - искра находится в расплавленном состоянии;
- II - переход искры из расплавленного состояния в твердое (кристаллизация);
- III - искра находится в твердом состоянии.

В зависимости от времени полета искры можно определить ее конечную температуру, с которой она попадет в горючую смесь. Для этого необходимо сравнить время полета искры со временем ее пребывания в расплавленном состоянии и периодом кристаллизации.

Если искра достигла горючего вещества в расплавленном состоянии ($\tau_{пол} < \tau_{распл}$), ее температуру определяют по формуле 3.16:

$$T_{и} = T_0 + (T_{нач} - T_0) \exp\left(-\frac{\tau_{пол} \alpha_k S_{и}}{c_p^{распл} m_{и}}\right) \quad (3.16)$$

Во время кристаллизации ($\tau_{кр} > \tau_{пол} > \tau_{распл}$) температура искры остается неизменной и равняется температуре плавления металла, из которого получена искра:

$$T_{и} = T_{пл}. \quad (3.17)$$

После кристаллизации ($\tau_{пол} > \tau_{кр} + \tau_{распл}$) происходит охлаждение искры в твердом состоянии; при этом температуру искры в конце полета можно определить по формуле:

$$T_{и} = T_0 + (T_{пл} - T_0) \exp\left(-\frac{(\tau_{пол} - (\tau_{кр} + \tau_{распл})) \alpha_k S_{и}}{c_p^{ТВ} m_{и}}\right), \quad (3.18)$$

где $c_p^{ТВ}$ – удельная теплоемкость искры в твердом состоянии, Дж·кг⁻¹·К⁻¹.

Если энергия искры, определенная по формуле (3.11), будет превышать минимальную энергию зажигания для данного горючего вещества, считают, что горючая система может быть зажжена, а искра является источником зажигания.

При определении пожароопасности искр топок и выхлопных труб двигателей следует учитывать, что источником зажигания могут быть искры, которые при диаметре 2 мм имеют температуру 1000 °С, 3 мм – 800 °С, 5 мм – 600 °С.

Для определения способности *нагретых поверхностей технологического оборудования* к зажиганию необходимо сравнить температуру поверхности оборудования с температурой самовоспламенения используемого вещества [31].

Температуру нагрева электрического провода при возникновении перегрузки рассчитывают по формуле 3.19:

$$t_{эл} = t_{сн} + \left(\frac{I_{ф}}{I_{доп}} \right) (t_{элн} - t_{сн}) \quad (3.19)$$

где: $t_{эл}$ – фактическая температура электрического провода, °С;
 $t_{сн}$ – нормативная температура среды для прокладки электрического провода, °С [32];
 $t_{элн}$ – нормативная температура электрического провода, °С;
 $I_{ф}$ – фактический ток в электрическом проводе, А;
 $I_{доп}$ – допустимый электрический ток в электрическом проводе, А.

Температуру нагрева подшипника скольжения при отсутствии смазочного масла и принудительного охлаждения, ленты транспортера при пробуксовывании, электрических контактов рассчитывают по формуле:

$$t_{нагр} = t_c + \frac{P}{\alpha_{общ} S} \left(1 - e^{-\frac{\tau}{\tau_{п.нагр}}} \right) \quad (3.20)$$

где $t_{нагр}$ – температура нагрева поверхности, °С;
 t_c – температура среды, °С;
 P – мощность нагрева, Вт;

• при нагреве электрических контактов: $P = I_{ф} \sum U_i$; (3.21)

• при нагреве подшипника скольжения: $P = \pi d f N n$; (3.22)

$I_{ф}$ – фактический электрический ток через контакт, А;

U_i – падение напряжения на каждом электрическом контакте, В;

f – коэффициент трения скольжения;

N – радиальная сила, которая действует на подшипник, или сила натяжения ленты, Н;

d – диаметр вала или диаметр барабана транспортера, м;

n – частота обращения вала, s^{-1} ;

$\alpha_{общ}$ – общий коэффициент теплоотдачи, $Вт \cdot м^{-2} K^{-1}$, который определяют по формуле:

если $t_{нагр} \leq 60$ °С: $\alpha_{общ} = 4,07 \cdot \sqrt[3]{t_{нагр} - t_c}$, (3.23)

если $t_{нагр} > 60$ °С: $\alpha_{общ} = 11,63 e^{0,023 t_{нагр}}$; (3.24)

температура $t_{\text{нагр}}$ берется в первом приближении для циклического расчета методом последовательных приближений, пока разность между принятой и рассчитанной величинами не будет превышать 5 %;

S – площадь поверхности теплообмена, м^2 ;

τ – фактическое время работы, с;

$\tau_{\text{п.нагр}} = \frac{c_p m}{\alpha_{\text{общ}} S}$ – постоянная времени нагрева, с;

c_p – удельная массовая теплоемкость металла, $\text{Дж кг}^{-1} \text{К}^{-1}$;

m – масса металла, кг.

На практике, при $\tau = 5\tau_{\text{п.нагр}}$ температура нагрева поверхности достигает максимального значения, которое рассчитывают по формуле:

$$t_{\text{max}} \approx t_c + \frac{P}{\alpha_{\text{общ}} S} \quad (3.25)$$

В некоторых случаях источником зажигания при контакте с горючими материалами могут выступать *тела, нагретые открытым пламенем или продуктами горения*. Особенно опасными являются электрогазосварочные ремонтные работы металлических конструкций. В этом случае температура тела будет возрастать не только в месте, на которое влияет тепловой импульс, но и на определенном расстоянии за счет высокой теплопроводности металла (см. рис. 2.3).

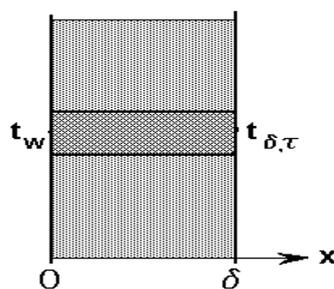


Рис. 3.3. Изменение температуры тела в слое теплоизоляции

Как известно [11], температуру тела на расстоянии δ через время τ можно рассчитать по формуле:

$$\frac{t_w - t_{\delta, \tau}}{t_w - t_0} = \text{erf}(A), \text{ откуда } t_{\delta, \tau} = t_w - (t_w - t_0) \text{erf}(A), \quad (3.26)$$

где $t_{\delta, \tau}$ – температура тела на расстоянии δ через время τ ;

t_w – постоянная температура поверхности тела, на которую действует тепловой импульс;

t_0 – начальная температура тела;

$\text{erf}(A)$ – функция Крампа, которую определяют по таблице 9 приложения.

Аргумент функции Крампа A определяется соотношением:

$$A = \frac{\delta}{2\sqrt{a_t \tau}}, \quad (3.27)$$

где $a_t = \frac{\lambda}{\rho c_p}$ - коэффициент температуропроводности.

Исходя из уравнений (3.26) и (3.27), можно определить критическое время $\tau_{кр}$, через которое температура тела на заданном расстоянии достигнет критического значения. Для этого сначала необходимо рассчитать функцию Крампа, что соответствует критической температуре, определить критическое значение аргумента $A_{кр}$ по таблице 9 приложений и рассчитать критическое время:

$$\frac{t_w - t_{кр}}{t_w - t_o} = \text{erf}(A_{кр}), \quad A_{кр} = \frac{\delta}{2\sqrt{a_t \tau_{кр}}};$$

или

$$\tau_{кр} = \frac{\delta^2}{4a_t A_{кр}^2}. \quad (3.28)$$

3.5 Методика определения способности электрических и фрикционных искр к зажиганию

1. Определить критическую температуру возникновения горения (температуру самовоспламенения $t_{св}$ газо- или паровоздушной смеси или температуру тления $t_{тл}$ твердых горючих материалов) и минимальную энергию зажигания E_{\min} горючего материала по справочнику [7] или по таблицам 10, 13, 14 приложений.

2. По виду искры определить ее максимальную температуру, диаметр, теплофизические параметры (таблицы 3.2, 3.3).

3. Рассчитать массу искры по формуле:

$$m_{и} = \frac{\pi}{6} d_{и}^3 \rho_{и} \quad (3.29)$$

4. Рассчитать время полета искры по формуле (3.12).

5. Рассчитать коэффициент конвекционной теплоотдачи по формуле (3.13).

6. Рассчитать площадь поверхности искры и время, которое искра находится в расплавленном состоянии, и время, за которое произойдет кристаллизация, по формулам (3.14), (3.15).

7. В зависимости от соотношения между временем полета искры $\tau_{пол}$ и временами ее пребывания в расплавленном состоянии $\tau_{распл}$ и периодом кристаллизации $\tau_{кр}$ рассчитать температуру искры по одной из формул (3.16), (3.17) или (3.18).

8. Рассчитать количество тепла, которое выделяется при охлаждении искры, по формуле (3.11).

9. Сравнить энергию искры с минимальной энергией зажигания горючего вещества и сделать вывод относительно возможности зажигания материала.

3.6 Пример решения задачи

Задача 1. Определить возможность зажигания сена при коротком замыкании алюминиевых проводов, которые проходят на высоте 2 м.

Решение

1. Определяем параметры зажигания сена по справочнику [7]: $t_{\text{пл}} = 204 \text{ }^\circ\text{C}$, $E_{\text{мин}} = 260 \text{ мДж}$.

2. Определяем максимальную температуру и диаметр искры короткого замыкания и теплофизические характеристики алюминия:

$$t_{\text{нач}} = 2500 \text{ }^\circ\text{C} = 2773 \text{ К}; \quad d_{\text{и}} = 3 \text{ мм} = 3 \cdot 10^{-3} \text{ м}; \quad t_{\text{пл}} = 660 \text{ }^\circ\text{C};$$
$$\rho_{\text{и}} = 2550 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}; \quad c_{\text{р}}^{\text{распл}} = 1140 \text{ Дж} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}.$$

3. Рассчитываем массу искры:

$$m_{\text{и}} = \frac{3,14}{6} (3 \cdot 10^{-3})^3 \cdot 2550 = 3,6 \cdot 10^{-5} \text{ кг}.$$

4. Рассчитываем время полета искры:

$$v_{\text{и}} = 0,5 \cdot \sqrt{2 \cdot 9,8 \cdot 2} = 3,16 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1};$$
$$\tau_{\text{пол}} = \frac{2}{3,16} = 0,6 \text{ с}.$$

5. Рассчитываем коэффициент конвективной теплоотдачи:

$$\alpha = 3,52 \sqrt{\frac{3,16}{3 \cdot 10^{-3}}} = 114,2 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{К}^{-1}.$$

6. Рассчитываем площадь поверхности искры и время, которое искра находится в расплавленном состоянии:

$$S_{\text{и}} = 3,14 \cdot 9 \cdot 10^{-6} = 28 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2;$$
$$\tau_{\text{распл}} = \frac{1140 \cdot 3,6 \cdot 10^{-5}}{114,2 \cdot 28 \cdot 10^{-6}} \ln \frac{2500 - 20}{660 - 20} = 17,3 \text{ с}.$$

7. Поскольку $\tau_{\text{пол}} < \tau_{\text{распл}}$, кристаллизация металла во время полета не произойдет. Рассчитываем температуру искры по формуле (3.16):

$$T_{\text{и}} = 293 + (2773 - 293) \exp\left(-\frac{0,6 \cdot 114,2 \cdot 28 \cdot 10^{-6}}{1140 \cdot 3,6 \cdot 10^{-5}}\right) = 2744 \text{ К};$$
$$t_{\text{и}} = 2744 - 273 = 2471 \text{ }^\circ\text{C}.$$

8. Рассчитываем количество тепла, выделяющееся при охлаждении искры, по формуле (3.13):

$$E_{и} = 3,6 \cdot 10^{-5} \cdot 1140(2471 - 204) = 93 \text{ Дж.}$$

9. Поскольку $E_{и} = 93 \text{ Дж} > E_{\min} = 0,26 \text{ Дж}$, зажигание сена искрой короткого замыкания проводов из алюминия возможно.

3.7 Методика определения склонности раскаленных поверхностей технологического оборудования к зажиганию

1. Определить критическую температуру возникновения горения горючего материала (температура самовоспламенения $t_{\text{св}}$ или температура тления $t_{\text{тл}}$) по справочнику [7] или по таблицам 10, 13, 14 приложений.

2. Рассчитать мощность нагрева по формуле (3.21) или (3.22).

3. Принять температуру нагрева поверхности в первом приближении и рассчитать коэффициент теплоотдачи по формуле (3.23) или (3.24).

4. Рассчитать постоянную времени нагрева по формуле 3.30:

$$\tau_{\text{п.нагр}} = \frac{c_p m}{\alpha_{\text{общ}} S}, \text{ с} \quad (3.30)$$

5. Сравнить постоянную времени нагрева с фактическим временем работы и рассчитать максимальную температуру нагрева поверхности по формуле (3.20) или (3.25).

6. Сравнить полученное значение температуры нагрева поверхности с величиной, принятой в первом приближении. Если рассчитанная температура нагрева отличается больше, чем на 5 % от взятой в первом приближении, повторить расчет, взяв полученную температуру во втором приближении.

7. Сравнить рассчитанную температуру нагрева поверхности с температурой самовоспламенения используемого материала и сделать вывод относительно возможности зажигания горючего вещества.

3.8 Пример решения задачи

Задача 1. Рассчитать температуру стального подшипника скольжения массой 100 г при аварийной работе насоса в случае нарушения процедуры смазывания поверхностей на протяжении 300 с. Сделать вывод, может ли данный подшипник стать источником зажигания для паровоздушной смеси бензина АИ-93 при температуре воздуха $t_c = 20 \text{ }^\circ\text{C}$, если частота вращения вала $n = 20 \text{ с}^{-1}$, диаметр вала $d = 0,04 \text{ м}$, коэффициент трения сталь-сталь без масла $f = 0,15$, поверхность теплообмена подшипника с воздухом $S = 0,1 \text{ м}^2$, радиальная сила, которая действует на подшипник, $N = 3600 \text{ Н}$.

Решение

1. Определяем температуру самовоспламенения бензина по справочнику [7]: $t_{\text{св АИ-93}} = 380 \text{ }^\circ\text{C}$.

2. Рассчитываем мощность нагрева подшипника за счет трения по формуле

(3.22):

$$P = 3,14 \cdot 0,04 \cdot 0,15 \cdot 3600 \cdot 20 = 1356,5 \text{ Вт.}$$

3. Определяем общий коэффициент теплоотдачи в первом приближении.

Примем $t_{\text{нагр}} = 440 \text{ }^\circ\text{C}$, т.е., поскольку $t_{\text{нагр}} > 60 \text{ }^\circ\text{C}$, коэффициент теплоотдачи рассчитываем по формуле (3.24):

$$\alpha_{\text{общ}} = 11,63e^{0,023 \cdot 440} = 32 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{К}^{-1}.$$

3. Рассчитываем постоянную времени нагрева подшипника, удельная массовая теплоемкость стали $c_p = 678 \text{ Дж} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$:

$$\tau_{\text{п.нагр}} = \frac{678 \cdot 0,1}{32 \cdot 0,1} = 21 \text{ с}.$$

4. Поскольку время аварийной работы насоса равняется 300 с, это больше, чем $5 \cdot 21 = 105 \text{ с}$, ведь рассчитываем максимальную температуру подшипника по формуле (3.25):

$$t_{\text{max}} \approx 20 + \frac{1356,5}{32 \cdot 0,1} = 443,9 \text{ }^\circ\text{C}.$$

5. Рассчитанная температура нагрева подшипника не отличается больше, чем на 5 % от взятого в первом приближении значения, т.е. погрешность расчета лежит в допустимых границах.

6. Определяем способность подшипника к зажиганию паров бензина в смеси с воздухом:

$$t_{\text{св.АГ-93}} = 380 \text{ }^\circ\text{C} < t_{\text{нагр}} = 443,9 \text{ }^\circ\text{C}$$

Таким образом, при данных условиях перегрев подшипника может вызвать зажигание паров бензина.

3.9 Методика определения способности к зажиганию тел, нагретых продуктами сгорания

1. Определить критическую температуру возникновения горения горючего материала (температура самовоспламенения $t_{\text{св}}$ или температура тления $t_{\text{тл}}$) по справочнику [7] или по таблицам 10, 13, 14 приложений.

2. Определить по табл. 2.9 или справочнику [9] теплофизические характеристики нагреваемого металла: плотность ρ , удельную массовую теплоемкость c_p , коэффициент теплопроводности λ , температуру плавления $t_{\text{пл}}$.

3. Рассчитать коэффициент теплопроводности металла по формуле:

$$a_t = \frac{\lambda}{\rho c_p} . \quad (3.31)$$

4. Рассчитать аргумент функции Крампа по формуле (3.27).
5. Определить функцию Крампа $\operatorname{erf}(A)$ по таблице 9 приложения.
6. Рассчитать температуру нагреваемого тела, на расстоянии δ через время τ по формуле (3.26).
7. Сравнить рассчитанную температуру нагрева поверхности с критической температурой возникновения горения материала, который контактирует с нагретым телом, и сделать вывод относительно возможности зажигания горючего вещества.
8. Рассчитать функцию Крампа, отвечающую критической температуре возникновения горения горючего материала, определить критическое значение аргумента $A_{кр}$ по таблице 9 приложений и рассчитать критическое время, через которое температура тела на заданном расстоянии достигнет критического значения, по формуле (3.28).

3.10 Пример решения задачи

Задача 1. В помещении проводятся огневые работы по резанию канализационной трубы из серого чугуна, которая проходит через стенку толщиной 0,2 м в соседнее помещение и соприкасается с деревянными конструкциями. Определить температуру металлической трубы на выходе со стены в соседнее помещение через 20 минут теплового воздействия, если начальная температура трубы составляла 20 °С. Выяснить, может ли нагрев трубы привести к возникновению горения деревянного перекрытия. Определить время, через которое в соседнем помещении при данной толщине стенки станет возможным возникновение горения.

Решение

1. Определяем по справочнику [7] температуру тления древесины: $t_{тл} = 265$ °С.
2. Определяем по табл. 2.9 теплофизические характеристики серого чугуна: $c_p = 420$ Дж·кг⁻¹·К⁻¹; $\rho = 7200$ кг·м⁻³; $t_{пл} = 1200$ С; $\lambda = 52$ Вт·м⁻¹·К⁻¹.
3. Рассчитываем коэффициент температуропроводности серого чугуна по формуле (**Ошибка! Источник ссылки не найден.**):

$$a_t = \frac{52}{7200 \cdot 420} = 1,72 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2 \cdot \text{с}^{-1}.$$

4. Рассчитываем аргумент функции Крампа по формуле (3.27):

$$A = \frac{0,2}{2\sqrt{1,72 \cdot 10^{-5} \cdot 1200}} = 0,696.$$

5. Определяем функцию Крампа $\operatorname{erf}(A)$ по таблице 9 приложения: $\operatorname{erf}(0,696)$

= 0,6778.

6. Рассчитываем по формуле (3.26) температуру трубы на расстоянии 0,2 м через 20 минут проведения огневых работ, учитывая, что температура нагрева трубы в месте действия газового резака равняется температуре плавления серого чугуна $t_w = 1200$ °С:

$$t_{\delta,\tau} = 1200 - 0,6778(1200 - 20) = 400 \text{ °С.}$$

7. Поскольку рассчитанная температура нагрева трубы 400 °С выше температуры тления древесины 265 °С, то зажигание деревянного перекрытия, через которое проходит труба, после 20 мин. проведения огневых работ возможно.

8. Рассчитываем критическое время, через которое температура трубы из серого чугуна на расстоянии 0,2 м достигнет критического значения 265 °С, по формуле (3.28):

$$\frac{t_w - t_{кр}}{t_w - t_0} = \frac{1200 - 265}{1200 - 20} = 0,792 ;$$
$$\text{erf}(A_{кр}) = 0,792 , \quad A_{кр} = 0,89 ;$$
$$\tau_{кр} = \frac{0,20^2}{4 \cdot 1,72 \cdot 10^{-5} \cdot 0,89^2} = 734 \text{ с.}$$

Вывод: во время проведения огневых работ по резанию канализационной трубы, которая соприкасается с деревянными конструкциями в соседнем помещении, нагревание трубы может привести к возникновению горения уже через 734 с.

3.11 Определение возможности зажигания горючих веществ лучистым потоком тепла от пламени

В самостоятельную группу источников зажигания выделяют открытое пламя и раскаленные продукты горения, которые являются опасными не только во время непосредственного контакта с горючей системой, поскольку температура пламени всегда выше температуры самовоспламенения большинства горючих веществ, но и вследствие излучения тепла, которое может нагреть горючую систему до критической температуры (температуры самовоспламенения или тления) [11], [22], [25].

Пожарная опасность пламени обусловлена интенсивностью теплового воздействия (плотностью теплового потока), которое определяется температурой зоны горения, площадью тепловосприятя горючего вещества (взаимным расположением) и временем воздействия на горючую систему.

Плотность теплового потока определяют по формуле 3.32:

$$q = \varepsilon \sigma (T_{пл}^4 - T_{гв}^4) \Psi, \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}, \quad (3.32)$$

где ε – приведенная степень черноты системы "пламя – поверхность горючего вещества" (относительный коэффициент теплового излучения);

σ – постоянная излучения Больцмана;

$T_{пл}$ – температура пламени;

$T_{гв}$ – температура поверхности горючего вещества;

Ψ – угловой коэффициент облучения.

В общем случае приведенная степень черноты системы ε зависит от степени черноты поверхностей факела (ε_1) и облучаемого тела (ε_2), а также от взаимного расположения этих тел. В большинстве ситуаций (при пространственном разнесении тел) приведенная степень черноты такой системы равняется:

$$\varepsilon = \varepsilon_1 \cdot \varepsilon_2. \quad (3.33)$$

Типичные значения степени черноты некоторых материалов и пламени горения разных веществ приведены в табл. 3.4.

Таблица 3.4. Степень черноты некоторых материалов и пламени при горении разных веществ

Материалы	Степень черноты
сталь (при температуре 200–600 °С)	0,8
сталь (при температуре 900–1100 °С)	0,56
чугун (при температуре 200–600 °С)	0,7
бетон (при температуре 1000 °С)	0,63
кирпич (при температуре 1100 °С)	0,8
древесина (при температуре 20 °С)	0,85
бумага (при температуре 20 °С)	0,85
резина (при температуре 20 °С)	0,9
Вид пламени	
бесцветное пламя газов	0,3
пламя газовых фонтанов	0,4
пламя угля	0,5
пламя древесины, торфа	0,7
пламя мазута	0,85
пламя бензина	0,95 – 0,99

В табл. 3.5 приведены типичные средние температуры диффузионного пламени некоторых материалов.

Таблица 3.5. Температуры пламени некоторых материалов или пожаро-опасных операций

Материал или операция	Температура пламени (*тления), °С
горючие жидкости	880 – 1000
древесина, пиломатериалы	1000 – 1100
природные, сжиженные газы	1200 – 1500
газовая сварка	3150
газовая резка металла	1350
папироса, сигарета	320 – 460*
спичка	620 – 640

Угловой коэффициент облучения Ψ определяют из предположения, что поверхность излучателя (пламени) является прямоугольной и параллельной плоскости облучения. Расчет коэффициента облучения выполняют, разбивая плоскость излучателя на базовые прямоугольники, и представляют искомый коэффициент облучения как сумму базовых коэффициентов облучения ψ' (рис. 3.4).

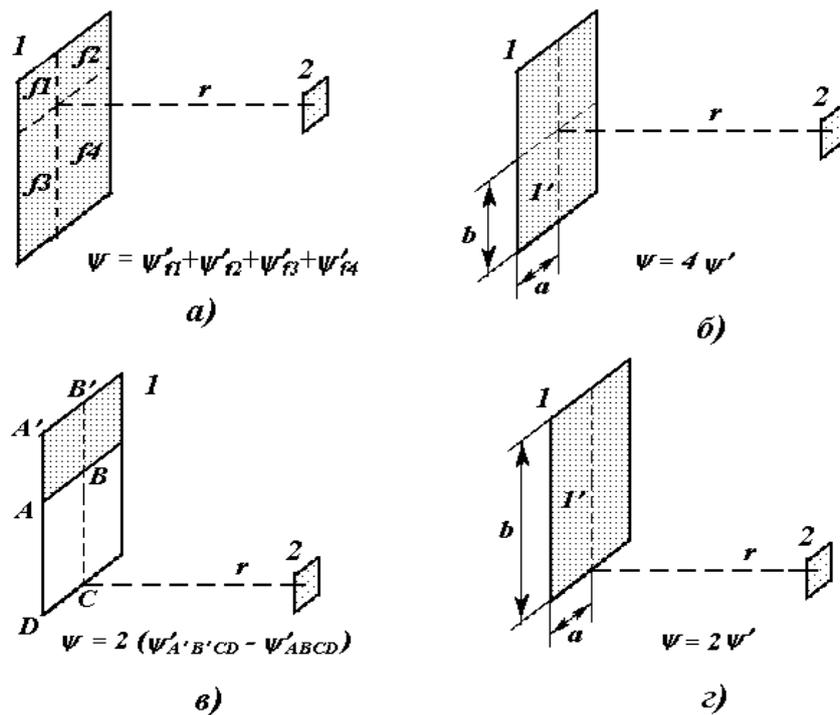


Рис. 3.4 – Схема базовой задачи лучистого теплообмена
 а) - г) - варианты взаимного расположения излучателя и облучаемого объекта;
 1 - базовая плоскость излучателя; 2 - облучаемый объект

Базовый коэффициент ψ' рассчитывают по формуле:

$$\psi' = \frac{1}{2\pi} \left[\frac{a}{\sqrt{a^2 + r^2}} \operatorname{arctg} \frac{b}{\sqrt{a^2 + r^2}} + \frac{b}{\sqrt{b^2 + r^2}} \operatorname{arctg} \frac{a}{\sqrt{b^2 + r^2}} \right], \quad (3.34)$$

где a, b – размеры базового прямоугольника, на которые разбивают плоскость излучателя (рис. 3.4);

r – расстояние между плоскостями 1 и 2.

Арктангенс в формуле (3.34) измеряют в радианах.

При больших расстояниях между поверхностями 1 и 2, т.е. при условии $r \gg a$ и $r \gg b$, функцию ψ' можно рассчитать по формуле:

$$\psi' = \frac{ab}{\pi r^2}. \quad (3.35)$$

Рассчитав величину теплового потока по формуле (3.32), можно найти температуру на поверхности облучаемого тела, через заданный промежуток времени:

$$t(\tau) = t_0 + 2 \frac{q}{\lambda} \sqrt{\frac{a_t \tau}{\pi}} \quad (3.36)$$

Существует взаимосвязь между значением плотности теплового потока и временем, через которое может возникнуть горение веществ (температура поверхности тела достигнет критического значения):

$$\tau_{\text{кр}} = \frac{\pi \lambda^2 (t_{\text{кр}} - t_0)^2}{4 a_t q^2} \quad (3.37)$$

Экспериментальные значения критической плотности теплового потока $q_{\text{кр}}$ при определенном времени облучения для некоторых горючих материалов приведены в таблице 3.6.

Таблица 3.6. Критическая плотность теплового потока $q_{\text{кр}}$ в зависимости от времени облучения для разных веществ

Вещество	$q_{\text{кр}}$ при длительности облучения, кВт·м ⁻²		
	3 мин.	5 мин.	15 мин.
древесина	18,8	16,9	13,9
торф	16,6	14,3	9,8
хлопок	11,0	9,7	7,5
пластик	21,6	19,1	15,4
резина	22,6	19,2	14,8
уголь	–	35,0	35,0

3.12 Методика определения способности теплового потока пламени к зажиганию горючих веществ

1. Определить критическую температуру возникновения горения материала (температуру самовоспламенения или температуру) по справочнику [7] или по таблицам 10, 13, 14 приложения.

2. Определить температуру факела пламени по табл. 3.5 или по расчетом (см. раздел I, глава 2, §3).

3. Рассчитать приведенную степень черноты по формуле (3.33) с учетом данных табл. 3.4.

4. Рассчитать базовый коэффициент облучения элементарной части факела пламени ψ' по формулам (3.34) или (3.35).

5. В зависимости от схемы взаимного расположения излучателя и облучаемого объекта, рассчитать коэффициент облучения всего факела.

6. Рассчитать плотность теплового потока, формула (3.32).

7. Рассчитать коэффициент температуропроводности облучаемого материала по формуле (3.31).

8. Рассчитать температуру на поверхности облучаемого тела через промежуток времени по формуле (3.36). Сравнить ее с критической температурой возникновения горения материала и сделать вывод относительно возможности зажигания.

9. Рассчитать время, через которое температура поверхности тела достигнет критического значения при данных условиях, по формуле (3.37).

3.13 Примеры решения задач

Задача 1. На расстоянии 30 м от факела газового фонтана находится деревянное здание. Определить, может ли произойти загорание здания через 30 минут, если поверхность факела имеет форму прямоугольника размерами 4х40 м, степень черноты газового фонтана равняется 0,4, степень черноты дерева – 0,85. Температура окружающей среды равняется 20 °С.

Решение

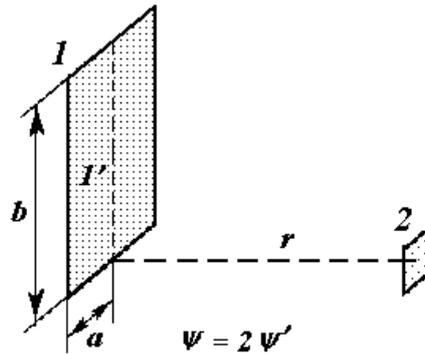
1. Определяем по справочнику [7] температуру тления древесины:
 $t_{\text{пл}} = 250 \text{ °С} = 523 \text{ К}$.

2. Определяем по табл. 3.4 температуру факела пламени газового фонтана:
 $t_{\text{пл}} = 1400 \text{ °С} = 1673 \text{ К}$.

3. Рассчитываем приведенную степень черноты системы «газовый фонтан – древесина» по формуле (3.33) с учетом значений степени черноты древесины и пламени фонтана (табл. 3.4):

$$\varepsilon = \varepsilon_1 \varepsilon_2 = 0,4 \cdot 0,85 = 0,34$$

4. Составляем схему взаимного расположения факела газового фонтана и здания, которое облучается, и рассчитываем базовый коэффициент облучения элементарной части факела пламени ψ' по формуле (3.34).



Размеры базового прямоугольника: $a = 2$ м; $b = 40$ м.

$\psi' = \frac{1}{2 \cdot 3,14} \left[\frac{2}{\sqrt{2^2 + 30^2}} \arctg \frac{40}{\sqrt{2^2 + 30^2}} + \frac{40}{\sqrt{40^2 + 30^2}} \arctg \frac{2}{\sqrt{40^2 + 30^2}} \right] = 0,015.5$. Рассчитываем коэффициент облучения всего факела:

$$\psi = 2\psi' = 2 \cdot 0,015 = 0,03.$$

6. Рассчитываем плотность теплового потока на деревянное здание по формуле (3.32):

$$q = 0,34 \cdot 5,67 \cdot 10^{-8} (1673^4 - 523^4) \cdot 0,03 = 4733 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}.$$

7. Рассчитываем коэффициент температуропроводности древесины по формуле (3.31) с учетом теплофизических характеристик древесины:

$$\lambda_{\text{древ}} = 0,17 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}; \rho_{\text{древ}} = 500 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3};$$

$$c_{p \text{ дрeв}} = 2,8 \text{ кДж} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{К}^{-1};$$

$$a_t = \frac{0,17}{500 \cdot 2,8 \cdot 10^3} = 1,2 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2 \cdot \text{с}^{-1}.$$

8. Рассчитываем температуру на поверхности здания через 30 минут теплового влияния факела по формуле (3.36):

$$t(30) = 20 + 2 \frac{4733}{0,17} \sqrt{\frac{1,2 \cdot 10^{-7} \cdot 30 \cdot 60}{3,14}} = 482 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Таким образом, через 30 минут теплового воздействия пламени газового фонтана температура поверхности деревянного здания достигнет $482 \text{ }^\circ\text{C}$, что превышает критическую температуру тления древесины, поэтому загорание здания является возможным.

9. Рассчитываем время, через которое температура поверхности здания достигнет температуры тления, по формуле (3.37):

$$\tau_{\text{кр}} = \frac{3,14 \cdot 0,17^2 (250 - 20)^2}{4 \cdot 1,2 \cdot 10^{-7} \cdot 4733^2} = 446 \text{ с}.$$

Вывод: температура на поверхности деревянного здания достигнет критического значения возникновения горения через 446 с теплового воздействия факела газового фонтана.

Задача 2. Металлическая печь установлена на расстоянии 0,5 м от дощатой деревянной стены. Боковая поверхность печи имеет размеры 0,8 х 0,6 м. Температура на внешней поверхности печи равняется 400 °С. Определить, возможно ли возникновение горения древесины, которая находится под тепловым воздействием в течении 2 часов. Температура окружающей среды равняется 25 °С.

Решение

1. Определяем по справочнику [7] температуру тления древесины: $t_{\text{тл}} = 250 \text{ °С} = 523 \text{ К}$.

2. Рассчитываем приведенную степень черноты системы с учетом данных табл. 3.1 по формуле (3.33):

$$\varepsilon = \varepsilon_1 \varepsilon_2 = 0,8 \cdot 0,85 = 0,68$$

3. Рассчитываем коэффициент облучения.

Схема взаимного расположения раскаленной поверхности печи и дощатой деревянной стены соответствует изображенной на рис. 2.4, б.

Рассчитываем базовый коэффициент облучения ψ' по формуле (3.34), если размеры базового прямоугольника: $a = 0,6/2 = 0,3 \text{ м}$; $b = 0,8/2 = 0,4 \text{ м}$.

$$\psi' = \frac{1}{2 \cdot 3,14} \left[\frac{0,3}{\sqrt{0,3^2 + 0,5^2}} \arctg \frac{0,4}{\sqrt{0,3^2 + 0,5^2}} + \frac{0,4}{\sqrt{0,4^2 + 0,5^2}} \arctg \frac{0,3}{\sqrt{0,4^2 + 0,5^2}} \right] = 0,09;$$

$$\psi = 4 \cdot \psi' = 4 \cdot 0,09 = 0,36.$$

4. Рассчитываем плотность теплового потока на дощатую стену по формуле (3.32):

$$q = 0,68 \cdot 5,67 \cdot 10^{-8} (673^4 - 523^4) \cdot 0,36 = 1809 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}.$$

5. Рассчитываем температуру на поверхности дощатой стены через 2 часа (7200 с) по формуле (3.36), учитывая, что коэффициент температуропроводности древесины равняется $1,2 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$ (см. предыдущую задачу):

$$t = 25 + 2 \frac{1809}{0,17} \sqrt{\frac{1,2 \cdot 10^{-7} \cdot 7200}{3,14}} = 378 \text{ °С}.$$

Таким образом, через 2 часа теплового воздействия раскаленной поверхности печи на дощатую деревянную стену температура поверхности стены достигнет 378 °С, что превышает критическую температуру тления, поэтому загорание стены возможно.

3.14 Задачи для самостоятельного решения

Задача 1. Для веществ, представленных в таблице, рассчитать минимальную энергию зажигания и безопасную энергию электрического разряда:

- по нормальной скорости распространения горения;
- по величине критического диаметра зазора.

Таблица 3.7. Данные для задачи 1:

№	Вещество	$u_n, \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$	БЭМЗ, мм	$t_{св}, ^\circ\text{C}$	$t_o, ^\circ\text{C}$
1	пропанол	0,49	0,99	371	0
2	хлорбутан	0,34	1,06	460	-5
3	этилен	0,73	0,59	435	20
4	бензин	0,45	0,96	269	-15
5	диэтиленоксид	0,52	0,87	250	-10
6	моноэтиловый эфир этиленгликоля	0,47	0,64	235	25
7	пентан	0,385	0,93	286	-25
8	пропан	0,39	0,92	470	10
9	пропилен	0,51	0,7	455	5
10	пропиленоксид	0,67	0,7	430	10
11	сероводород	0,41	0,89	246	15
12	сероуглерод	0,59	0,23	102	-30
13	тетрагидрофуран	0,52	0,87	250	0
14	фуран	0,63	0,68	510	-5
15	фуранальдегид	0,87	0,41	298	20
16	фурфурол	0,41	0,87	298	10
17	циклогексан	0,44	0,94	260	25
18	этан	0,48	0,91	515	-15
19	этилацетат	0,39	0,99	446	15
20	этиленоксид	0,9	0,59	430	20

Задача 2. Для веществ, представленных в таблице, определить возможность зажигания при короткого замыкания электрических проводов. Начальные условия, параметры проводов и горючего материала указаны в таблице 3.8.

Таблица 3.8. Данные для задачи 2:

№	Металл проводов	Высота проводов, м	Горючий материал	E_{\min} , мДж	t_0 , °C
1	алюминий	9,0	сено	260,0	20
2	– / –	4,5	казеин	60	25
3	– / –	2,0	какао	100,0	35
4	– / –	1,0	крахмал картофельный	45,0	40
5	– / –	3,0	крахмал пшеничный	25,0	30
6	– / –	1,5	лигнин	20,0	28
7	– / –	2,5	ликоподий	40,0	18
8	– / –	7,0	келлин	4,6	20
9	– / –	6,0	ванадий (порошок)	8,0	23
10	– / –	2,5	резина	50,0	32
11	– / –	3,0	метилцеллюлоза	20,0	25
12	– / –	5,0	пшеничная мука	29,0	35
13	медь	7,0	полиуретан	15,0	30
14	– / –	9,0	сера	15,0	20
15	– / –	4,5	хлопок	25,0	23
16	– / –	3,0	целлюлоза	25,0	38
17	– / –	3,8	шеллак	10,0	40
18	– / –	4,0	этилцеллюлоза	10,0	25
19	– / –	2,0	шрот подсолнечный	13,8	28
20	– / –	1,0	мука ячневая	85,0	30
21	– / –	1,0	карбамид	80,0	20
22	– / –	2,0	кофе	30,0	25
23	– / –	1,0	кукурузная мука	80,0	20
24	– / –	2,5	полипропилен (порошок)	3,4	35
25	– / –	3,0	полистирол	3,4	15

Задача 3. Определить возможность возникновения горения газо- или паровоздушной горючей смеси при контакте с подшипником скольжения, который работал без масла и принудительного охлаждения в течении заданного времени. Площадь поверхности подшипника, омываемого воздухом, $S = 0,07 \text{ м}^2$; масса – 100 г, диаметр шейки вала $d = 0,02 \text{ г}$. Условия, при которых происходит перегрев подшипника, приведены в таблице 3.9.

Таблица 3.9. Данные для задачи 3:

№	Горючее вещество	Металлы, трущиеся в подшипнике	Время аварийной работы, с	Радиальная сила, кН	Частота вращения, с^{-1}	Коэффициент трения, f	$t_c, \text{ }^\circ\text{C}$
1	метан	сталь–сталь	100	2,5	24	0,15	20
2	водород	– // –	120	3,0	27	0,16	25
3	сероводород	– // –	200	3,5	30	0,17	35
4	этилен	– // –	360	4,0	22	0,18	40
5	бензин	сталь–чугун	250	2,8	24	0,19	30
6	стирол	– // –	90	3,8	28	0,20	28
7	толуол	– // –	180	3,1	31	0,15	18
8	сероуглерод	– // –	240	4,2	23	0,16	20
9	изооктан	сталь–бронза	300	2,2	23	0,17	23
10	н-гексан	– // –	120	2,7	26	0,18	32
11	н-гептан	– // –	60	3,4	29	0,19	25
12	н-бутан	– // –	200	3,6	21	0,20	35
13	ацетон	чугун–бронза	350	4,1	25	0,15	30
14	<i>n</i> -ксилол	– // –	150	3,2	27	0,16	20
15	диэтиловый эфир	– // –	100	2,8	32	0,17	23
16	этилцеллозольв	– // –	140	3,3	22	0,18	38
17	этилацетат	чугун–чугун	250	2,1	25	0,19	40
18	уайт-спирит	– // –	120	4,3	34	0,20	25
19	циклогексан	– // –	340	2,9	24	0,15	28
20	пропан	– // –	200	3,7	26	0,16	30

Задача 4. Для паровоздушной смеси или горючего материала, который во время газосварочных работ находится в соседнем помещении в контакте с трубой, проходящей через стенку заданной толщины, определить:

а) возможность возникновения горения через заданное время, в течении которого проводились огневые работы (начальная температура заданна в таблице);

б) критическое время, через которое в соседнем помещении при данных условиях станет возможным возникновение горения.

Таблица 3.10. Данные для задачи 4:

№	Горючий материал	Материал трубы	Время теплового влияния, мин	Толщина стенки, м	t_0 , °C
1	хлопок	чугун	20	0,20	10
2	пентан	— / —	5	0,05	15
3	войлок строительный	— / —	12	0,10	20
4	фуран	— / —	10	0,15	25
5	плита деревоволокнистая	— / —	15	0,25	0
6	этилнитрат	— / —	7	0,07	5
7	опилки сосновые	— / —	3	0,20	10
8	циклогексан	сталь	14	0,05	15
9	этилкарбинол	— / —	25	0,10	20
10	сено	— / —	20	0,15	25
11	уайт-спирит	— / —	15	0,25	0
12	дрожжи кормовые	— / —	10	0,07	5
13	сероуглерод	— / —	7	0,20	10
14	сланцевая пыль	— / —	12	0,05	15
15	пропанол	медь	22	0,10	20
16	плита минераловатная	— / —	8	0,15	25
17	мука древесная	— / —	15	0,25	0
18	удобрение для теплиц	— / —	17	0,07	5
19	ундекан	— / —	20	0,12	10
20	картон кровельный	— / —	15	0,30	30

Задача 5. Для приведенных в таблице горючих материалов, которые подвергаются заданному тепловому влиянию раскаленных тел, определить:

а) возможность возникновения горения через заданное время (начальная температура задана в таблице 3.11);

б) критическое время, через которое при данных условиях станет возможным возникновение горения.

Таблица 3.11. Данные для задачи 5:

№ варианта	Горючий материал	Плотность потока тепла, Вт·м ⁻²	Время теплового влияния, мин	t ₀ , °С	t _{ТД} , °С	ρ, кг·м ⁻³	λ, Вт·м ⁻¹ ·К ⁻¹	c _p , кДж·кг ⁻¹ ·К ⁻¹
1	древесностружечная огнестойкая плита	2500	50	20	375	750	0,14	3,2
2	войлок строительный	1850	20	0	285	300	0,05	1,9
3	древесина сосновая	1300	35	10	280	500	0,5	2,7
4	смесь полистирола с каучуком	3200	15	15	325	1050	0,16	2,0
5	текстиль	7500	7	30	455	250	0,05	1,7
6	фанера березовая	4200	25	25	300	450	0,3	2,8
7	опилки дубовые	2800	40	17	229	200	0,08	2,7
8	пенопласт	1500	55	5	265	125	0,06	1,5
9	пробковая плита	5500	10	22	250	175	0,04	1,75
10	резина пористая	8900	15	15	312	250	0,05	1,5
11	резина техническая	12000	30	35	325	1550	0,15	1,6
12	кожа	2700	5	7	250	700	0,14	2,5
13	текстолит	9200	20	12	355	1350	0,24	1,45
14	плита торфяная	1300	45	25	225	425	0,07	1,9
15	хлопок	2500	25	20	205	50	0,06	1,4

ПРИЛОЖЕНИЕ

Таблица 1. Молярная энтальпия продуктов горения при постоянном давлении

Температура, К	Энтальпия, кДж·моль ⁻¹							
	Воздух	CO ₂	H ₂ O	N ₂	HF	HCl	HBr	SO ₂
298,15	8,66	9,35	9,91	8,67	8,60	35,99	76,50	44,61
400	11,64	13,36	13,36	11,64	11,56	38,96	79,50	78,86
600	17,62	22,25	20,41	17,56	17,40	44,83	85,40	88,15
800	23,86	32,14	27,93	23,71	23,28	50,82	91,50	98,33
1000	30,36	42,72	35,94	30,13	29,25	57,04	97,80	109,04
1200	37,09	53,77	44,48	36,78	35,36	63,48	104,40	120,08
1400	44,00	65,19	53,51	43,61	41,63	70,12	111,20	131,35
1600	51,05	76,87	62,97	50,58	48,08	76,94	118,10	142,77
1800	58,20	88,70	72,82	57,65	54,70	83,90	125,20	154,31
2000	65,44	100,71	83,02	64,81	61,45	90,99	132,40	165,95
2200	72,76	112,82	93,41	71,97	68,27	98,08	139,60	177,55
2400	80,14	125,04	104,14	79,26	75,26	105,34	147,00	189,27
2600	86,58	137,32	115,08	86,57	82,32	112,67	154,40	201,21
2800	95,06	149,69	126,22	93,91	89,48	120,09	161,70	213,16
3000	102,60	162,10	137,56	101,30	96,74	127,64	169,40	225,15
3200	110,17	174,55	149,05	108,71	104,04	135,06	177,00	237,24
3400	117,77	187,06	160,69	116,14	111,40	142,62	184,70	249,36
3600	125,41	199,61	172,47	123,61	118,84	150,24	192,40	261,59
3800	133,08	212,19	184,37	131,08	126,33	157,90	200,00	273,89
4000	140,77	224,81	196,42	138,58	133,85	165,60	207,90	286,20

Таблица 2. Объемная энтальпия продуктов горения при постоянном давлении

Температура, К	Энтальпия, кДж·м ⁻³							
	Воздух	CO ₂	H ₂ O	N ₂	HF	HCl	HBr	SO ₂
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1220,44	3029,89	2858,55
298,15	386,44	417,23	442,22	386,88	383,76	1605,98	3415,89	1990,63
400	519,41	596,16	596,16	519,41	515,84	1738,51	3548,87	3518,97
600	786,26	992,86	910,75	783,58	776,44	2000,45	3811,69	3933,51
800	1064,70	1434,18	1246,32	1058,01	1038,82	2267,74	4083,89	4865,68
1000	1354,75	1906,29	1603,75	1344,49	1305,22	2545,29	4366,8	5109,04
1200	1655,07	2399,38	1984,83	1641,23	1577,8	2832,66	4660,87	5358,32
1400	1963,41	2908,97	2387,77	1946,01	1857,65	3128,96	4963,41	5861,22
1600	2278,00	3450,17	2809,91	2257,03	2145,47	3433,29	5273,99	6370,82
1800	2597,06	3958,06	3249,44	2572,51	2440,88	3743,86	5589,92	6885,77
2000	2920,13	4493,98	3704,60	2892,01	2742,08	4060,24	5911,65	7405,18
2200	3246,77	5034,36	4168,23	3211,51	3046,43	4376,62	6231,15	7922,80
2400	3576,08	5579,65	4647,03	3536,81	3358,32	4700,58	6559,57	8445,78
2600	3863,45	6127,62	5135,21	3863,01	3673,36	5027,67	6892,01	8978,58
2800	4241,86	6679,61	5632,31	4190,54	3992,86	5358,77	7217,32	9511,83
3000	4578,31	7233,38	6138,33	4520,30	4316,82	5695,67	7563,14	10046,85
3200	4916,11	7788,93	6651,05	4850,96	4642,57	6026,77	7901,83	10586,35
3400	5255,24	8347,17	7170,46	5182,51	4970,99	6364,12	8244,09	11127,18
3600	5596,16	8907,18	7696,12	5515,84	5302,99	6704,15	8587,24	11672,91
3800	5938,42	9468,54	8227,13	5849,17	5637,22	7045,96	8933,51	12221,78
4000	6281,57	10031,68	8764,84	6183,85	5972,78	7389,56	9281,12	12771,08

Таблица 3. Молярная внутренняя энергия продуктов горения при постоянном объеме

Температура, К	Внутренняя энергия продуктов горения, кДж·моль ⁻¹							
	Воздух	CO ₂	H ₂ O	N ₂	HF	HCl	HBr	SO ₂
298,15	6,24	6,93	7,49	6,25	6,18	33,57	74,10	42,19
400	8,39	10,11	10,11	8,39	8,31	35,71	76,20	75,61
600	12,74	17,37	15,53	12,68	12,52	39,96	80,50	83,28
800	17,36	25,64	21,43	17,21	16,78	44,32	85,00	91,83
1000	22,23	34,59	27,81	22,00	21,12	48,91	89,70	100,92
1200	27,34	44,02	34,73	27,03	25,61	53,73	94,70	110,33
1400	32,62	53,81	42,13	32,23	30,25	58,74	99,80	119,98
1600	38,05	63,87	49,97	37,58	35,08	63,94	105,10	129,77
1800	43,57	74,07	58,19	43,02	40,07	69,27	110,60	139,69
2000	49,18	84,46	66,77	48,55	45,19	74,74	116,20	149,70
2200	54,88	94,94	75,53	54,09	50,39	80,20	121,70	159,68
2400	60,63	105,54	84,64	59,75	55,75	85,84	127,50	169,77
2600	65,45	116,19	93,95	65,44	61,19	91,54	133,30	180,09
2800	72,30	126,94	103,46	71,15	66,72	97,33	138,90	190,41
3000	78,22	137,72	113,18	76,92	72,36	103,26	145,10	200,78
3200	84,16	148,55	123,04	82,70	78,03	109,05	151,00	211,24
3400	90,14	159,43	133,06	88,51	83,77	114,99	157,10	221,74
3600	96,15	170,36	143,21	94,35	89,58	120,98	163,10	232,34
3800	102,20	181,31	153,49	100,20	95,44	127,02	169,30	243,02
4000	108,26	192,31	163,91	106,07	101,34	133,09	175,40	253,70

Таблица 4. Теплоемкость и теплота образования простых веществ и продуктов горения

Вещество	Теплоемкость молярная c_p , Дж·моль ⁻¹ ·К ⁻¹	Коэффициенты уравнения $c_p = a + bT$, Дж·моль ⁻¹ ·К ⁻¹		Коэффициенты уравнения $c_p = a + bT$, Дж·м ⁻³ ·К ⁻¹		Теплота обра- зования, ΔH_f^0 кДж·моль ⁻¹
		a	$b \cdot 10^3$	a	$b \cdot 10^3$	
воздух	29,16	28,62	4,08	1172,95	167,21	0,00
O ₂	29,36	31,46	3,39	1289,34	138,93	0,00
N ₂	29,10	27,87	4,27	1142,21	175,00	0,00
NO	29,83	29,58	3,85	1212,30	157,79	90,37
NO ₂	37,11	42,93	8,54	1759,43	350,00	33,89
CO	29,15	28,41	4,10	1164,34	168,03	-110,5
CO ₂	37,13	44,14	9,04	1809,02	370,49	-393,51
C (графит)	8,53	17,15	4,27	–	–	0
H ₂	28,83	27,28	3,26	1118,03	133,61	0
H ₂ O (газ)	33,56	30,00	10,71	1229,51	438,93	-241,84
H ₂ O (жидкость)	75,31	–	–	–	–	-285,84
HF	29,16	27,70	2,93	1135,25	120,08	-268,61
HCl	29,16	26,53	4,60	1087,30	188,52	-92,30
HBr	29,16	26,15	5,86	1071,72	240,16	-35,98
HJ	29,16	26,32	5,94	1078,69	243,44	25,94
SO ₂	39,87	42,55	12,55	1743,85	514,34	-296,90
SO ₃	50,63	57,32	26,86	2349,18	1100,82	-395,20
H ₂ S	33,93	29,37	15,40	1203,69	631,15	-20,15
NH ₃	36,65	29,80	26,48	1221,31	1085,25	-46,19

Таблица 5. Содержание карбоновых кислот в составе жиров

Жир, масло	Содержание кислот в составе глицеридов жира, %															общее содержание насыщенных кислот			
	олеиновая	пальмитолеиновая	линолевая	олеостеариновая	линоленовая	эруковая (C ₂₀ -C ₂₄)	рицинолевая	петрозелиновая	вакценовая	ликановая	масляная	капроновая	каприловая	каприновая	лауриновая		миристиновая	пальмитиновая	стеариновая
кокосовое	<10	0,5	<1									0-2	6-9	<10	<51	<20	<10	1-5	
пальмоядерное	<10	0,5	<1									0-2	6-9	<10	<51	<20	<10	1-5	
какао-масло	38		2														25	35	
пальмовое	<52	<2	8-9												+	1-3	<45	4-6	
тунговое	4-9		<15	<83															4-5
ойтисиковое	6			0,5					81										11
льняное	<20		<59		<45														5-10
перилловое	<23		16		<70														6-7
конопляное	<16		<70		27												9		10
соевое	26	<1	54		7-9										+	<10	+	12-15	
маковое	<30		<73																10
подсолнечное	<35		<72		<1														8-12
рыжейное	27		50		19	<5													6-7
кунжутное	<49	0,5	<48												0,1	7-8	4-6	12-16	
кукурузное	44		46														6-7		10
хлопковое	<44	<1	<50													<25	1-2	19-31	
горчичное	28		20		2	50													4
кориандровое	32		7					53											8
рапсовое	16		15		7-9	47											2		3
арахисовое	<26																		13-22
оливковое	<85	<1	<20														+	+	9-12
касторовое	3-9		3				85												3
сливочное	33	<5	4							3,7	<2	1	<3	<3	8-9	25	11	45	
говяжий	<44	2,5	2-5		0,4				3-4						2-3	28	<29		

* – кислоты с тремя ненасыщенными связями; + – кислота имеется в составе глицеридов жира.

Таблица 6. Химические формулы некоторых карбоновых кислот

№	Наименование кислоты		Формула кислоты
	систематическое	тривиальное	
Насыщенные кислоты			
1	метановая	муравьиная	HCOOH
2	этановая	уксусная	CH_3COOH
3	пропановая	пропионовая	$\text{C}_2\text{H}_5\text{COOH}$
4	бутановая	масляная	$\text{C}_3\text{H}_7\text{COOH}$
5	пентановая	валериановая	$\text{C}_4\text{H}_9\text{COOH}$
6	гексановая	капроновая	$\text{C}_5\text{H}_{11}\text{COOH}$
7	гептановая	энантовая	$\text{C}_6\text{H}_{13}\text{COOH}$
8	октановая	каприловая	$\text{C}_7\text{H}_{15}\text{COOH}$
9	нонановая	пеларгоновая	$\text{C}_8\text{H}_{17}\text{COOH}$
10	декановая	каприновая	$\text{C}_9\text{H}_{19}\text{COOH}$
11	гендекановая	ундекановая	$\text{C}_{10}\text{H}_{21}\text{COOH}$
12	додекановая	лауриновая	$\text{C}_{11}\text{H}_{23}\text{COOH}$
13	тридекановая		$\text{C}_{12}\text{H}_{25}\text{COOH}$
14	тетрадекановая	миристиновая	$\text{C}_{13}\text{H}_{27}\text{COOH}$
15	пентадекановая		$\text{C}_{14}\text{H}_{29}\text{COOH}$
16	гексадекановая	пальмитиновая	$\text{C}_{15}\text{H}_{31}\text{COOH}$
17	гептадекановая	маргариновая	$\text{C}_{16}\text{H}_{33}\text{COOH}$
18	октадекановая	стеариновая	$\text{C}_{17}\text{H}_{35}\text{COOH}$
19	нонадекановая		$\text{C}_{18}\text{H}_{37}\text{COOH}$
20	эйкозановая	арахиновая	$\text{C}_{19}\text{H}_{39}\text{COOH}$
21	генийкозановая		$\text{C}_{20}\text{H}_{41}\text{COOH}$
22	докозановая	бегеновая	$\text{C}_{21}\text{H}_{43}\text{COOH}$
23	трикозановая		$\text{C}_{22}\text{H}_{45}\text{COOH}$
24	тетракозановая		$\text{C}_{23}\text{H}_{47}\text{COOH}$
25	пентакозановая		$\text{C}_{24}\text{H}_{49}\text{COOH}$
26	гексакозановая	цератиновая	$\text{C}_{25}\text{H}_{51}\text{COOH}$
27	гептакозановая		$\text{C}_{26}\text{H}_{53}\text{COOH}$
28	октакозановая	монтановая	$\text{C}_{27}\text{H}_{55}\text{COOH}$
29	нонановая		$\text{C}_{28}\text{H}_{57}\text{COOH}$
30	триаконтановая	мелиссиновая	$\text{C}_{29}\text{H}_{59}\text{COOH}$

Продолжение таблицы 7

№	Наименование кислоты		Формула кислоты
	систематическое	тривиальное	
Насыщенные кислоты			
1	метановая	муравьиная	HCOOH
2	этановая	уксусная	CH_3COOH
3	пропановая	пропионовая	$\text{C}_2\text{H}_5\text{COOH}$
4	бутановая	масляная	$\text{C}_3\text{H}_7\text{COOH}$
5	пентановая	валериановая	$\text{C}_4\text{H}_9\text{COOH}$
6	гексановая	капроновая	$\text{C}_5\text{H}_{11}\text{COOH}$
7	гептановая	энантовая	$\text{C}_6\text{H}_{13}\text{COOH}$
8	октановая	каприловая	$\text{C}_7\text{H}_{15}\text{COOH}$
9	нонановая	пеларгоновая	$\text{C}_8\text{H}_{17}\text{COOH}$
10	декановая	каприновая	$\text{C}_9\text{H}_{19}\text{COOH}$
11	гендекановая	ундекановая	$\text{C}_{10}\text{H}_{21}\text{COOH}$
12	додекановая	лауриновая	$\text{C}_{11}\text{H}_{23}\text{COOH}$
13	тридекановая		$\text{C}_{12}\text{H}_{25}\text{COOH}$
14	тетрадекановая	миристиновая	$\text{C}_{13}\text{H}_{27}\text{COOH}$
15	пентадекановая		$\text{C}_{14}\text{H}_{29}\text{COOH}$
16	гексадекановая	пальмитиновая	$\text{C}_{15}\text{H}_{31}\text{COOH}$
17	гептадекановая	маргариновая	$\text{C}_{16}\text{H}_{33}\text{COOH}$
18	октадекановая	стеариновая	$\text{C}_{17}\text{H}_{35}\text{COOH}$
19	нонадекановая		$\text{C}_{18}\text{H}_{37}\text{COOH}$
20	эйкозановая	арахиновая	$\text{C}_{19}\text{H}_{39}\text{COOH}$
21	генийкозановая		$\text{C}_{20}\text{H}_{41}\text{COOH}$
22	докозановая	бегеновая	$\text{C}_{21}\text{H}_{43}\text{COOH}$
23	трикозановая		$\text{C}_{22}\text{H}_{45}\text{COOH}$
24	тетракозановая		$\text{C}_{23}\text{H}_{47}\text{COOH}$
25	пентакозановая		$\text{C}_{24}\text{H}_{49}\text{COOH}$
26	гексакозановая	цератиновая	$\text{C}_{25}\text{H}_{51}\text{COOH}$
27	гептакозановая		$\text{C}_{26}\text{H}_{53}\text{COOH}$
28	октакозановая	монтановая	$\text{C}_{27}\text{H}_{55}\text{COOH}$
29	нонановая		$\text{C}_{28}\text{H}_{57}\text{COOH}$
30	триаконтановая	мелиссиновая	$\text{C}_{29}\text{H}_{59}\text{COOH}$

Продолжение таблицы 6

№	Наименование кислоты		Формула кислоты
	систематическое	тривиальное	
Ненасыщенные кислоты олеинового ряда			
31	деценовая		$C_9H_{17}COOH$
32	додеценовая	лауроолеиновая	$C_{11}H_{21}COOH$
33	тетрадеценовая	миристоолеиновая	$C_{13}H_{25}COOH$
34	гексадеценовая	– пальмитоолеиновая	$C_{15}H_{29}COOH$
35	октадеценовая	– олеиновая – петрозелиновая – вакценовая	$C_{17}H_{33}COOH$
36	эйкозеновая	гадолеиновая	$C_{19}H_{37}COOH$
37	докозеновая	– цетолеиновая – эруковая	$C_{21}H_{41}COOH$
38	тетракозеновая	нервоновая	$C_{23}H_{45}COOH$
Ненасыщенные кислоты полиолефинового ряда			
39	гексадекатриеновая	– хирагоновая	$C_{15}H_{25}COOH$
40	октадекадиеновая	– линолевая	$C_{17}H_{31}COOH$
41	октадекатриеновая	– линоленовая – элеостеариновая	$C_{17}H_{29}COOH$
42	октадекатетраеновая	паринаровая	$C_{17}H_{27}COOH$
43		абиетиновая	$C_{19}H_{29}COOH$
44	эйкозатетраеновая	арахидоновая	$C_{19}H_{31}COOH$
45	докозапентаеновая	крупаноновая	$C_{21}H_{33}COOH$
46	тетракозагексаеновая	низиновая	$C_{23}H_{35}COOH$
Ненасыщенные кислоты с дополнительными кислородосодержащими группами			
47	гидроксиолеиновая	рицинолевая	$C_{27}H_{32}OHCOOH$
48	кетозелеостеариновая	ликановая	$C_{17}H_{27}OSCOOH$

Таблица 8. Константы уравнений Таубкина для расчета параметров теплового самовозгорания

№	Вещество или материал	A_p	n_p	A_b	n_b
1	хлопок	2,018	0,140	2,332	0,057
2	хлопок объемный 2-й сорт	1,986	0,157	2,334	0,061
3	краситель азоксипигмент желтый светостойкий (основного вещества 23 %) $C_{16}H_{12}O_4N_4Cl_2$	1,983	0,144	2,396	0,175
4	краситель азоксипигмент бордо ЖВ $C_{21}H_{18}O_5N_4$	2,124	0,093	2,298	0,092
5	краситель азоксипигмент ярко-красный 4ЖВ $C_{24}H_{17}O_3N_3Cl_2$ (основного вещества 40 %)	2,023	0,142	2,323	0,054
6	краситель дисперсный красный Ж $C_{16}H_{18}O_3N_4$ (основного вещества 6 %)	1,894	0,146	2,198	0,096
7	краситель дисперсный бордо 2С $C_{17}H_{19}O_4N_4$	2,046	0,073	2,268	0,100
8	краситель дисперсный красно-коричневый $C_{16}H_{16}O_3N_3Cl_2$	1,922	0,146	2,259	0,059
9	краситель дисперсный фиолетовый 4К $C_{17}H_{19}O_6N_5$	1,928	0,100	2,182	0,071
10	краситель диспергатор НФ	1,997	0,156	2,432	0,154
11	краситель зеленый пигмент	1,900	0,150		
12	краситель нигрозин спирторастворимый	1,708	2,220	2,254	0,260
13	краситель кислотный фиолетовый $C_{37}H_{35}O_6N_3S_2Na$ (основного вещества 25 %)	2,117	0,060	2,248	0,024
14	краситель кислотный зеленый $C_{37}H_{35}O_6N_2S_2Na$ (основного вещества 30 %)	2,105	0,067		
15	краситель бутиловый ксантогенат калия	1,853	0,133	2,196	0,132
16	краситель цианол голубой 4 „3„	1,793	0,167	2,181	0,178
17	краситель кубазол „Серый С„	2,009	0,100	2,340	0,225
18	битум нефтяной окисленный	1,7241	0,259	2,291	0,122
19	брикетированная травяная резка	1,8877	0,177	2,266	0,124
20	гудрон нефтяной	1,743	0,259	2,310	0,122

Продолжение таблицы 7

№	Вещество или материал	A _p	n _p	A _b	n _b
21	краситель 4,8-диамино 1,5-диоксиатрахион	2,020	0,173	2,628	0,340
22	мука витаминная из листьев	1,897	0,157	2,268	0,106
23	мука ржаная	1,815	0,235	2,360	0,130
24	мука шламовая фосфорная	1,112	0,512	2,354	0,418
25	мука витаминная из хвои	1,772	0,230	2,282	0,121
26	мука кормовая	1,507	0,322	2,103	0,244
27	войлок строительный	1,726	0,279	2,350	0,140
28	войлок минеральный на битумной основе	1,724	0,259	2,291	0,122
29	витамин B ₂	1,716	0,220	2,140	0,300
30	уголь активированный АП-14	1,921	0,161	2,221	0,085
31	уголь активированный марки Б	1,697	0,289	2,209	0,388
32	гранитоль (кожзаменитель с покрытием на нитроцеллюлозной основе)	1,307	0,390	2,160	0,150
33	гипсотермин в виде крошки	1,792	0,272	2,362	0,107
34	дерматин (кожзаменитель с покрытием на нитроцеллюлозной основе)	1,661	0,230	2,160	0,090
35	дрожжи кормовые	1,661	0,230	2,53	0,231
36	дрожжи хлебные	1,895	0,174	2,279	0,168
37	удобрение для теплиц	2,307	0,041	2,147	0,073
38	изип (бактериальный препарат)	2,078	0,089	2,356	0,110
39	ионообменная смола СГ № 30 (полидисперсный порошок)	1,744	0,177	2,100	0,098
40	картон кровельный	2,146	0,106	2,350	0,048
41	катализатор К-14	1,974	0,159	2,334	0,142
42	кордная пыль	1,776	0,225	2,174	0,229
43	кормарин	1,897	0,14	2,527	0,7
44	кормогрезин 10	1,531	0,310	2,185	0,212
45	ледерин (кожзаменитель)	1,757	0,231	2,299	0,198
46	моющее средство „Лотос-7„	1,174	0,470	2,210	0,180
47	нитроамофос НАФ, марка А (1:1)	1,880	0,240	2,340	0,050
48	нитроамофоска НАФК, марка А (1:1:1)	1,927	0,149	2,201	0,081

Продолжение таблицы 7

№	Вещество или материал	A _p	n _p	A _b	n _b
49	нитроаммофоска с кубовыми остатками аминов в индустриальном масле НАФК КОА (1:1:1)	2,021	0,110	2,271	0,041
50	нитроаммофоска с мочевиной	1,835	0,188	2,283	0,075
51	плита ДВП изоляционная	1,864	0,207	2,381	0,075
52	плита ДВП полутвердая	1,834	0,227	2,332	0,104
53	плита минераловатная с содержанием битума 19 %	2,202	0,134	2,313	0,119
54	плита торфяная	1,760	0,248	2,271	0,117
55	полилак (смола полиакрилонитрильная)	1,956	0,113	2,230	0,100
56	препарат № 30"М", нанесенный на хлопок (1:1)	1,923	0,132	2,220	0,050
57	- // - на шлаковату (1:2,8)	1,792	0,175	2,250	0,150
58	полимицин	1,762	0,275	2,332	0,121
59	сено	2,103	0,109	2,311	0,058
60	сера	2,062	0,119	2,327	0,073
61	силос	1,884	0,182	2,300	0,113
62	солома пшеницы	2,169	0,067	2,438	0,035
63	сланцевая пыль	1,611	0,288	2,255	0,145
64	опилки сосновые	1,855	0,219	2,296	0,096
65	торф	2,554	0,181	1,298	0,031
66	торф фрезерный	1,781	0,264	2,396	0,180
67	тизолин	1,707	0,228		
68	товарные дрожжи, влажность 8 %	1,867	0,184	2,254	0,077
69	табак не ферментированный краснодарский 4-й сорт	1,869	0,207	2,314	0,126
70	табак ферментированный краснодарский 2 сорт	1,986	0,137	2,322	0,111
71	фитобактериомицин	1,937	0,204	2,353	0,175
72	целюлигнин карбонизированный ЦБК	1,902	0,170	2,192	0,102
73	цинеб 80 %	1,626	0,194	2,078	0,093
74	цинеб 80 % в смеси с ТНТД-80 в соотношении 17:3	1,650	0,146	1,973	0,151

Таблица 9. Значения Гауссова интеграла ошибок (функции Крампа)

A	erf(A)	A	erf(A)	A	erf(A)	A	erf(A)
0,00	0,0000	0,50	0,5205	1,00	0,8427	1,50	0,9661
0,02	0,0216	0,52	0,5379	1,02	0,8508	1,52	0,9684
0,04	0,0451	0,54	0,5549	1,04	0,8586	1,54	0,9706
0,06	0,0676	0,56	0,5716	1,06	0,8661	1,56	0,9726
0,08	0,0901	0,58	0,5876	1,08	0,8733	1,58	0,9745
0,10	0,1125	0,60	0,6039	1,10	0,8802	1,60	0,9763
0,12	0,1348	0,62	0,6194	1,12	0,8868	1,62	0,9780
0,14	0,1569	0,64	0,6346	1,14	0,8931	1,64	0,9796
0,16	0,1790	0,66	0,6494	1,16	0,8991	1,66	0,9811
0,18	0,2009	0,68	0,6638	1,18	0,9048	1,68	0,9826
0,20	0,2227	0,70	0,6778	1,20	0,9103	1,70	0,9838
0,22	0,2443	0,72	0,6914	1,22	0,9155	1,72	0,9850
0,24	0,2657	0,74	0,7047	1,24	0,9205	1,74	0,9861
0,26	0,2869	0,76	0,7175	1,26	0,9252	1,76	0,9872
0,28	0,3079	0,78	0,7300	1,28	0,9297	1,78	0,9882
0,30	0,3286	0,80	0,7421	1,30	0,9340	1,80	0,9892
0,32	0,3491	0,82	0,7538	1,32	0,9381	1,90	0,9928
0,34	0,3694	0,84	0,7651	1,34	0,9419	2,00	0,9953
0,36	0,3893	0,86	0,7761	1,36	0,9456	2,10	0,9970
0,38	0,4090	0,88	0,7867	1,38	0,9460	2,20	0,9981
0,40	0,4284	0,90	0,7969	1,40	0,9523	2,30	0,9989
0,42	0,4475	0,92	0,8068	1,42	0,9554	2,40	0,9993
0,44	0,4662	0,94	0,8163	1,44	0,9583	2,50	0,9996
0,46	0,4847	0,96	0,8254	1,46	0,9611	2,60	0,9998
0,48	0,5027	0,98	0,8312	1,48	0,9637	2,70	0,9999

Таблица 10. Показатели пожаровзрывоопасности пыли органических веществ

Вид пыли	Температура самовоспл., °С		НКМПП, г·м ⁻³	Миним. энергия зажигания, мДж	Максимальное давление взрыва, кПа	Макс. скорость нарастания давления, кПа·с ⁻¹
	аэрозоль	аэрогель				
арахис	460	210	45	50	829	57140
хлопок	407	–	>44	25	630	17500
белок яйца	610	–	140	640	414	3570
мука ржаная	415	325	–	5,5	250	–
мука кукурузная	–	–	37	46,4	–	–
мука пшеничная	380	360	50	50	779	26430
мука соевая	550	340	60	100	670	5710
мука ячневая	–	–	33	85	–	–
ванадий	500	490	220	8,0	350	6900
витамин С	460	280	70	60	630	34290
уголь	605	210	120	120	443	2860
уголь древесный	530	180	140	20	714	12860
горох	560	–	50	40	710	43000
резина	350	–	25	50	–	26200
декстрин	410	440	50	40	707	64290
декстрин зерновой	410	390	40	40	886	50000
дрожжи	520	260	50	50	880	25000
желатин сушеный	620	480	500	–	560	8570
кофе	450	350	17	160	350	1800
казеин	>460	–	45	60	460	3500
какао	500	200	65	120	493	8570
карбамид	450	–	70	80	600	14000
качан кукурузный	450	240	45	45	907	26430
келлин	–	–	24	4,6	465	13800
кора березовая	450	250	20	60	710	52000
корица	440	230	60	30	864	27860
крахмал кукурузный	390	–	40	30	1036	67860

Продолжение таблицы 9

Вид пыли	Температура самовоспл., °С		НКМПП, г·м ⁻³	Миним. энергия зажигания, мДж	Максимальное давление взрыва, кПа	Макс. скорость нарастания давления, кПа·с ⁻¹
	аэрозоль	аерогель				
крахмал картофельный	420	320	40–60	45	670	15800
крахмал пшеничный	430	–	45	25	714	46430
лигнин	450	300	40	20	710	35000
ликоподий	480	310	25	40	610	50000
люцерна	460		100	320	460	7100
макуха солодковая	470	–	50	25	670	4290
молоко сухое	490	200	50	50	680	16430
метилцеллюлоза	340	–	30	20	968	37900
бумага	440	270	55	60	690	25710
пектин	410	200	75	35	943	57140
полипропилен	–	325	40	3,4	590	39000
полиуретан	510	390	25	15	670	26000
полиэтилен (н.т.)	–	417	33	5,6	630	37000
пробка	460	210	35	35	686	53570
протеин сои	540	–	50	60	700	46430
рис	440	240	50	50	750	19290
сахароза	420	–	45	40	614	39290
мочевино-форм. смола	430	–	20	34	786	11430
сено	490	180	70	260	440	4200
сера	190	–	35	15	560	32400
торф	460	240	45	50	743	15710
целлюлоза	410	300	45	40	836	57140
цитрусовая кожура	500	330	60	100	407	8570
сахар	370	400	45	30	780	35710
шеллак	390	–	>15	10	510	24800
шрот подсолнечный	775	–	7	14	–	–
этилцеллюлоза	310	293	>25	10	840	49000
ячмень солодовый	400	250	55	35	680	31430

Таблица 11. Показатели пожаровзрывоопасности пыли некоторых кормов

№	Вещество	Элементный состав, мас. %					Показатели пожаровзрывоопасности				Q_H , кДж·кг ⁻¹
		C	H	O	N	S	φ'_{H_2} , Г·М ⁻³	P_{max} , кПа	dP/dt , МПа·с ⁻¹	φ_{MBC} , об.%	
1	высевки пше- ничные	43,6	7,0	44,7	3,4	1,25	55	483	6,2	11,8	17677
2	дрожжи кормо- вые	35,6	6,2	44,58	7,9	5,8	36	650	9,2	11,0	19087
3	кукуруза дробле- ная	43,5	5,4	47,15	2,6	1,35	37	651	6,9	11,5	17543
4	пшеница дробле- ная	47	6,95	41,11	3,7	1,3	38	524	14,2	12,8	17322
5	ячмень дробле- ный	43,5	6,0	46,01	3,1	1,42	47	645	11,4	12,3	17372
6	горох дробленный	45,8	6,5	42,8	3,6	1,3	52	620	19,3	11,8	18292
7	овес дробленный	46,6	6,77	43,23	3,1	0,34	54	650	4,67	12,0	19206
8	просо дробленое	44,1	6,82	46,02	2,5	0,58	36	–	–	–	18972
9	шрот подсолнеч- ный	41,7	6,46	44,44	6,1	1,25	40	532	9,4	11,3	18368
10	шрот соевый	43	6,57	42,32	6,9	1,2	49	673	12,5	16,0	18485
11	шрот хлопка	45,1	6,41	41,72	5,3	1,56	42	547	4,07	12,5	21786

Таблица 12. Параметры процесса горения некоторых веществ и материалов (при н.у.)

№	Вещество	Объем воздуха V^0 , м ³ /кг	Объем продуктов сгорания $V^0_{пр}$, м ³ /кг	Коэффициент пол- ноты сгорания η	Массовая ско- рость выгора- ния V_m , 10 ⁻³ , кг/(м ² с)	Линейная скорость выгорания V_b , 10 ⁻⁶ , м/с	Нормальная ско- рость распростра- нения горения V_l , м/с	Теплота сгорания Q^0 , кДж/кг	Температура горения, К	Температура са- мовоспламенения, °С	Минимальная энергия зажига- ния E_{min} , мДж
1	аммиак NH ₃	4,70	5,68	0,97	-	-	0,23	18618	1777	650	680
2	ацетилен C ₂ H ₂	10,3	10,7	0,85	-	-	1,57	50038	2322	335	-
3	бутан C ₄ H ₁₀	11,9	12,9	0,85	-	-	0,45	45810	-	405	0,25
4	водород H ₂	26,6	32,3	0,85	-	-	2,7	120800	2400	510	0,017
5	оксид углерода CO	1,9	2,3	0,97	-	-	-	10107	-	605	-
6	этан C ₂ H ₆	12,4	13,6	0,85	-	-	-	52533	-	515	0,48
7	эпоксиэтан C ₂ H ₄ O	6,06	6,83	0,93	-	-	0,9	27727	-	430	0,06
8	этилен C ₂ H ₄	11,4	12,22	0,85	-	-	0,74	47071	-	435	0,12
9	сероводород H ₂ S	4,71	5,03	0,97	-	-	0,41	15394	-	246	0,07
10	метан CH ₄	13,3	14,7	0,85	-	-	0,39	50125	1300	537	0,28
11	акриловая кислота C ₃ H ₄ O ₂	4,44	5,08	0,97	37,0	-	-	17763	-	440	-
12	амилацетат C ₇ H ₁₄ O ₂	7,80	8,56	0,93	-	-	0,4	29879	-	290	-
13	амиловый спирт C ₅ H ₁₂ O	9,10	10,0	0,93	17,5	21,6	-	38385	-	300	-
14	анилин C ₆ H ₇ N	8,90	9,34	0,93	-	-	-	32385	-	617	-
15	ацетон C ₃ H ₆ O	7,35	8,14	0,93	44	55,5	0,44	28890	-	535	0,41
16	бензол C ₆ H ₆	10,3	10,7	0,85	72	83	0,48	38520	2300	560	0,22
17	бутанон-2 C ₄ H ₈ O	8,14	8,92	0,93	66	-	0,58	34297	-	514	0,28
18	бутилацетат C ₆ H ₁₂ O ₂	7,35	8,14	0,93	52	-	0,4	28280	-	330	-
19	бутиловый спирт C ₄ H ₁₀ O	8,64	9,52	0,93	45,5	18	-	36805	-	340	0,28
20	гексан C ₆ H ₁₄	11,8	12,7	0,85	103	-	0,39	45105	-	233	0,25
21	гексиловый спирт C ₆ H ₁₄ O	8,0	8,92	0,93	43	-	-	39653	-	285	-
22	глицерин C ₃ H ₈ O ₃	4,06	4,90	0,97	-	-	-	16102	-	400	-
23	диизопропиловый эфир C ₆ H ₁₄ O	9,42	10,3	0,93	87,3	95-115	-	36552	-	443	1,1
24	диэтиловый эфир C ₄ H ₁₀ O	8,65	9,55	0,93	104	82	0,49	34147	-	180	0,2

Продолжение таблицы 11

№	Вещество	Объем воздуха $V^0_{в}$, м ³ /кг	Объем продуктов сгорания $V^0_{пр}$, м ³ /кг	Коэффициент полноты сгорания η	Массовая скорость выгорания V_m , 10 ⁻³ , кг/(м ² с)	Линейная скорость выгорания V_n , 10 ⁻⁶ , м/с	Нормальная скорость распространения горения V_l , м/с	Теплота сгорания $Q'_{н}$, кДж/кг	Температура горения, К	Температура са-мовоспламенения, °С	Минимальная энергия зажигания E_{min} , мДж
25	этилацетат C ₄ H ₈ O ₂	6,06	6,83	0,93	55	22		23613	2213	446	0,28
26	этилбензол C ₈ H ₁₀	10,56	11,07	0,85	88			41386	1592	431	0,2 (100°С)
27	этиленгликоль C ₂ H ₆ O ₂	4,16	5,06	0,97	-			19319		412	-
28	ацетон C ₃ H ₆ O	7,35	8,14	0,93	44	55,5	0,44	28890	-	535	0,41
29	бензол C ₆ H ₆	10,3	10,7	0,85	72	83	0,48	38520	2300	560	0,22
30	бутанон-2 C ₄ H ₈ O	8,14	8,92	0,93	66		0,58	34297		514	0,28
31	бутилацетат C ₆ H ₁₂ O ₂	7,35	8,14	0,93	52		0,4	28280	-	330	-
32	бутиловый спирт C ₄ H ₁₀ O	8,64	9,52	0,93	45,5	18	-	36805	-	340	0,28
33	гексан C ₆ H ₁₄	11,8	12,7	0,85	103		0,39	45105	-	233	0,25
34	гексиловый спирт C ₆ H ₁₄ O	8,0	8,92	0,93	43			39653	-	285	
35	глицерин C ₃ H ₈ O ₃	4,06	4,90	0,97				16102	-	400	-
36	диизопропиловый эфир C ₆ H ₁₄ O	9,42	10,3	0,93	87,3	95-115		36552	-	443	1,1
37	диэтиловый эфир C ₄ H ₁₀ O	8,65	9,55	0,93	104	82	0,49	34147	-	180	0,2
38	этилацетат C ₄ H ₈ O ₂	6,06	6,83	0,93	55	22		23613	2213	446	0,28
39	этилбензол C ₈ H ₁₀	10,56	11,07	0,85	88			41386	1592	431	0,2 (100°С)
40	этиленгликоль C ₂ H ₆ O ₂	4,16	5,06	0,97	-			19319		412	-
41	этиловый спирт C ₂ H ₆ O	6,95	7,91	0,93	33	33-42	0,56	27200	1800	400	0,25
42	изопентан C ₅ H ₁₂	11,9	12,8	0,86	105	167	0,37	45220		432	0,28
43	изопропилбензол (кумол) C ₉ H ₁₂	10,68	11,24	0,85	60	60-73		46663	1620	424	0,18
44	изопропиловый спирт C ₃ H ₈ O	8,0	8,92	0,93	31,3	42-45	0,42	30145		430	0,65
45	изопропилформиат C ₄ H ₈ O ₂	6,06	6,83	0,93	73			23465		440	

Продолжение таблицы 11

№	Вещество	Объем воздуха $V^0_{в}$, м ³ /кг	Объем продуктов сгорания $V^0_{пр}$, м ³ /кг	Коэффициент пол- ноты сгорания η	Массовая ско- рость выгора- ния V_m , 10 ⁻³ , кг/(м ² с)	Линейная скорость выгорания V_h , 10 ⁻⁶ , м/с	Нормальная ско- рость распростра- нения горения V_l , м/с	Теплота сгорания Q'_h , кДж/кг	Температура горения, К	Температура са- мовоспламенения, °С	Минимальная энергия зажига- ния E_{min} , мДж
46	сероуглерод CS ₂	4,2	4,2	0,97	36,8	28	0,59	184134	2400	102	0,01
47	хлорбензол C ₆ H ₅ Cl	6,63	7,03	0,93	45	28-47		27315	1530	637	
48	циклогексанол C ₆ H ₁₂ O	9,06	9,85	0,93	40	42-45		35114		300	0,77 (75 °С)
49	циклогексанон C ₆ H ₁₀ O	8,7	9,37	0,93	32	43-52	0,7 (100°С)	34074		420	1,3 (50 °С)
50	капролактam C ₆ H ₁₁ ON	7,76	8,54	0,91	26	24		31849		400	
51	бензин	11,6	12,4	0,85	62,0	55-83		41870	1200	375	0,4
52	битум	9,45	10,4	0,93				35000	-	390	-
53	керосин	11,4	12,3	0,85	48	60-67		43540	-	240	-
54	дизельное топливо	11,5	12,0	0,85	42	55		48870	-	210- 310	-
55	нафта	11,8	11,9	0,85	22-28	25-33		43500- 46000	1400	> 222	
56	мазут	11,3	11,9	0,85	15,5	17		38100- 41900	1000	250	
57	топливо Т1	11,4	12,3	0,85	18,0			43040		220	0,18 (100 °С)
58	скипидар	11,0	11,6	0,85	-			44000		> 245	0,4 (50 °С)

Продолжение таблицы 11

№	Вещество	Объем воздуха $V^0_{в}$, м ³ /кг	Объем продуктов сгорания $V^0_{пр}$, м ³ /кг	Коэффициент полноты сгорания η	Массовая скорость выгорания $V_{пр}$, 10 ⁻³ , кг/(м ² с)	Линейная скорость выгорания $V_{л}$, 10 ⁻⁶ , м/с	Нормальная скорость распространения горения $V_{н}$, м/с	Теплота сгорания $Q'_{н}$, кДж/кг	Температура горения, К	Температура самовоспламенения, °С	Минимальная энергия зажигания $E_{мин}$, мДж
59	каучук синтетический	10,2	10,8	0,85	12	7-10		40200		> 305	30
60	кинопленка нитроцеллюлозная	3,62	4,32	0,97	5			150642	1500	> 120	
61	кинопленка триацетатная	4,34	4,97	0,97	9			18800			
62	книги на стеллажах	3,95	4,64	0,97	6 - 10			13400			
63	натрий				12-15			10880	900	330	
64	органическое стекло				14			27737			
65	бумага	3,95	4,64	0,97	11			13400			
66	полистирол	10,3	10,7	0,85	14			39000	1500	> 439	3,4
67	полипропилен в изделиях	11,4	12,2	0,87	15			45600	1550	> 325	3,4
68	полиэтилен в изделиях	11,4	12,2	0,85	10			47100	1950	> 349	6-30
69	пенополиуретан	6,00	6,55	0,93	15	173-190		24300			20
70	текстолит марки А				7			22430		> 500	
71	торф влажностью 10 %	5,01	5,66	0,93	10,6			16613	1100	405	
72	- / - / - 20 %	4,54	5,14	0,97	-			11300			
73	- / - / - 30 %	3,96	4,62	0,97	4-5	17-33					
74	фенопласты				6					> 325(A3)	

Таблица 13. Значение показателей пожарной опасности некоторых смесей и технических продуктов

№	Продукт (состав смеси), % мас.	Суммарная формула	Молярная масса, кг·кмоль ⁻¹	Температура вспышки, °С	Температура само- воспламенения, °С	Константы Антуана			Темп. интервал кон- стант Антуана, °С	НКПП, % (об)	Теплота сгорания, кДж·кг ⁻¹
						A	B	C _a			
1	бензин авиационный Б-70	C _{7,267} H _{14,796}	102,2	-34	300	7,5442	2629,65	384,2	-40 ÷ 100	0,79	44094
2	бензин А-72 (зимний)	C _{6,991} H _{13,108}	97,2	-36	-	4,195	682,88	222,07	-60 ÷ 85	1,08	44239
3	бензин АИ-93 (летний)	C _{7,024} H _{13,706}	98,2	-36	-	4,1231	664,98	221,7	-60 ÷ 95	1,06	43641
4	бензин АИ-93 (зимний)	C _{6,911} H _{12,168}	95,3	-37	-	4,2651	695,02	223,22	-60 ÷ 90	1,1	43641
5	дизельное топливо "З"	C _{12,343} H _{23,889}	172,3	> +35	225	5,0782	1255,73	199,52	40 ÷ 210	0,61	43590
6	дизельное топливо "Л"	C _{14,511} H _{29,120}	203,6	> +40	210	5,0011	1314,04	192,47	60 ÷ 240	0,52	43419
7	керосин осветительный КО-20	C _{13,595} H _{28,860}	191,7	> +40	227	4,8218	1211,73	194,68	40 ÷ 240	0,55	43692
8	керосин осветительный КО-22	C _{10,914} H _{21,832}	153,1	> +40	245	5,596	1394,72	204,26	40 ÷ 190	0,64	43692
9	керосин осветительный КО-25	C _{11,054} H _{21,752}	154,7	> +40	236	5,125	1223,85	203,34	40 ÷ 190	0,66	43692
10	ксилол (смесь изомеров)	C ₈ H ₁₀	106,17	+29	490	6,1797	1478,16	220,54	0 ÷ 50	1,1	43154
11	уайт-спирит	C _{10,5} H ₂₁	147,3	> 33	250	7,1362	2218,3	273,15	20 ÷ 80	0,7	43996
12	масло трансформаторное	C _{21,74} H _{42,28} S _{0,04}	303,9	>135	270	6,8841	2524,17	174,01	164 ÷ 343	0,29	43111
13	растворитель Р-4 (н- бутилацетат 12 %, толуол 62 %, ацетон 26 %)	C _{5,452} H _{7,606} O _{0,535}	81,7	-7	550	6,2969	1373,67	242,83	-15 ÷ 100	1,65	40936
14	растворитель Р-4 (ксилол 15 %, толуол 70 %, ацетон 15 %)	C _{6,231} H _{7,798} O _{0,223}	86,3	-4	-	6,2785	1415,2	244,75	-15 ÷ 100	1,38	43154

Продолжение таблицы 12

№	Продукт (состав смеси), % мас.	Суммарная формула	Молярная масса, кг·кмоль ⁻¹	Температура вспышки, °С	Температура само- воспламенения, °С	Константы Антуана			Темп. интервал кон- стант Антуана, °С	НКПЦ, % (об)	Теплота сгорания, кДж·кг ⁻¹
						A	B	C _a			
15	масло АМТ-300	C _{22,25} H _{33,48} S _{0,34} N _{0,07}	312,9	>170	290	6,1244	2240,0	167,85	170÷ 376	0,2	42257
16	масло АМТ-300Г	C _{19,04} H _{24,58} S _{0,196} N _{0,04}	260,3	>189	334	5,6202	2023,77	164,09	171÷ 396	0,2	41778
17	растворитель Р-5 (н- бутилацетат 30 %, ксилол 40 %, ацетон 30 %)	C _{5,309} H _{8,655} O _{0,897}	86,8	-9	-	6,3034	1378,85	245,039	-15÷100	1,57	43154
18	растворитель Р-12 (н- бутилацетат 30 %, толуол 60 %, ксилол 10 %)	C _{6,837} H _{9,217} O _{0,515}	99,6	10	-	6,173	1403,08	221,48	0 ÷ 100	1,26	43154
19	растворитель М (н-бутил- ацетат 30 %, этилацетат 5 %, этиловый спирт 60 %, изобутиловый спирт 5 %)	C _{2,761} H _{7,147} O _{1,187}	59,36	6	397	8,057	2083,57	267,74	0 ÷ 50	2,79	36743
20	растворитель РМЛ (толуол 10 %, этиловый спирт 64 %, н-бутиловый спирт 10 %, этилцеллозольв 16 %)	C _{2,645} H _{6,810} O _{1,038}	55,24	10	374	8,6965	2487,73	290,92	0 ÷ 50	2,85	40936
21	растворитель РМЛ-218 (н- бутилацетат 9%, ксилол 21,5 %, толуол 21,5 %, эти- ловый спирт 16 %, н- бутиловый спирт 3 %, этилцеллозольв 13 %, эти- лацетат 16 %)	C _{4,791} H _{8,318} O _{0,974}	81,51	4	399	7,2024	1761,04	251,55	0 ÷ 50	1,72	43154

Таблица 14. Объемные теплоты сгорания и минимальные энергии зажигания газов и жидкостей

Вещество		Теплота сгорания, кДж·м ⁻³		Минимальная энергия зажигания, мДж	Теплота образования, ΔН ^o _f , кДж·моль ⁻¹	t _{св} , °С
название	формула	высшая, Q'' _в	низшая, Q'' _н			
метан	СН ₄	39820	35880	0,28	-74,8	537
этан	С ₂ Н ₆	70310	64360	0,24	-84,68	515
пропан	С ₃ Н ₈	101210	93180	0,22	-103,8	470
н-бутан	С ₄ Н ₁₀	133800	123570	0,25	-126,0	405
пентан	С ₅ Н ₁₂	169270	150630	0,22	-146,4	286
н-гексан	С ₆ Н ₁₄	187400	187400	0,25	-167,2	233
н-гептан	С ₇ Н ₁₆	216880	200550	0,25	-187,7	223
циклогексан	С ₆ Н ₁₂	–	–	0,22	-123,13	259
изооктан	С ₈ Н ₁₈	–	–	1,35	–	411
водород	Н ₂	12750	10790	0,017	0	510
сульфид водорода	Н ₂ С	25350	23700	0,068	–	246
сульфид углерода	СS ₂	–	–	0,009	88,7	102
оксид углерода	СО	12640	12640	–	-110,5	605
этилен	С ₂ Н ₄			0,12		435
этилцеллозольв	С ₄ Н ₁₀ О ₂			0,15	-405,0	235
бензин АИ–92				0,3		435
уайт-спирит	С _{10,5} Н ₂₁	–	–	0,33		250
п-ксилол	С ₈ Н ₁₀			84,5	-24,4	528

Таблица 15. Теплота образования и константы Антуана некоторых жидкостей

Вещество	Формула	ΔH°_f , кДж·моль ⁻¹	Константы Антуана		
			A	B	C _a
акриловая кислота	C ₃ H ₄ O ₂	-336	7,0931	1913	236,0
акролеин	C ₃ H ₄ O	-58,5	6,190	1156,947	230,60
алиловый спирт	C ₃ H ₆ O	-131,8	7,6594	1944,765	247,60
амилбензол	C ₁₁ H ₁₆	-34,4	6,6832	2069,486	210,43
амилметилкетон	C ₇ H ₁₄ O	-291	9,2537	3336,004	310,07
амиловый спирт	C ₅ H ₁₂ O	-302,5	6,307	1287,625	161,33
амилциклогексан	C ₁₁ H ₂₂	-233,8	6,33628	1808,242	213,89
анилин	C ₆ H ₇ N	109	6,04162	1457,02	176,19
ацетон	C ₃ H ₆ O	-217,57	6,3755	1281,721	237,09
ацетонитрил	C ₂ H ₃ N	-25,62	7,27	1838	273,00
бензилбензоат	C ₁₄ H ₁₂ O ₂	-372,84	9,2	4057	273,00
бензиловый спирт	C ₇ H ₈ O	-220,86	8,7223	2664,68	279,64
бензол	C ₆ H ₆	82,9	5,6139	902,275	178,10
бутаналь	C ₄ H ₈ O	-205	7,0839	1768,4	273,00
бутандиол-2,3	C ₄ H ₁₀ O ₂	-445,5	8,67	3024	273,00
бутановая кислота	C ₄ H ₈ O ₂	-486,3	7,4394	2158,56	233,66
бутанон	C ₄ H ₈ O	-238,3	6,1494	1292,79	232,34
изобутилацетат	C ₆ H ₁₂ O ₂	-535,5	6,24133	1332,3	205,57
бутилбензол	C ₁₀ H ₁₄	-13,7	6,5495	1882,49	230,94
бутилметилкетон	C ₆ H ₁₂ O	-272	6,6317	1613,425	221,67
бутанол	C ₄ H ₁₀ O	-274,6	8,7223	2664,68	279,64

Продолжение таблицы 14

Вещество	Формула	ΔH°_f , кДж·моль ⁻¹	Константы Антуана		
			A	B	C _a
бутилфенол	C ₁₀ H ₁₄ O	-285,12	6,4777	1928,57	207,18
бутилформиат	C ₅ H ₁₀ O ₂	-437,6	6,8194	1711,66	249,58
валериановая кислота	C ₅ H ₁₀ O ₂	-490,4	8,0456	2661,49	256,17
валериановый альдегид	C ₅ H ₁₀ O	-227,8	6,4554	1460,27	225,18
валеролактон	C ₅ H ₈ O ₂	-421,14	7,331	2540,4	273,00
гексадекан	C ₁₆ H ₃₄	-373,3	5,9124	1656,405	136,87
гексадиен	C ₆ H ₁₀	-94,1	6,132	1184,99	227,70
гексан	C ₆ H ₁₄	167,2	5,9951	1166,27	223,66
гексилметилкетон	C ₈ H ₁₆ O	-311,7	6,9090	1980,4	230,92
гексиловый спирт	C ₆ H ₁₄ O	-319,8	6,1789	1293,83	152,63
гептан	C ₇ H ₁₆	-187,7	6,0764	1295,405	219,82
декан	C ₁₀ H ₂₂	-249,6	6,5202	1809,975	227,70
диацетоновый спирт	C ₆ H ₁₂ O ₂	-425	7,216	2188	253,00
дибутиловый эфир	C ₈ H ₁₈ O	-333,9	6,4403	1648,4	230,00
диизопропилкетон	C ₇ H ₁₄ O	-291	7,1	2021,4	273,00
диоксан	C ₄ H ₈ O ₂	-434,16	6,989	1866,7	273,00
дипропиловый эфир	C ₆ H ₁₄ O	-293,4	6,240	1397,34	240,20
диэтиламин	C ₄ H ₁₁ N	-137,34	7,22	1709	273,00
диэтиленгликоль	C ₄ H ₁₀ O ₃	-642,84	7,2767	2727,3	273,00
диэтилизопропилметан	C ₈ H ₁₈	-211,2	5,9885	1318,12	215,30
диэтилкетон	C ₅ H ₁₀ O	-252	6,3555	1477,021	237,52
диэтиловый эфир	C ₄ H ₁₀ O	-252,2	6,1228	1098,945	232,37

Продолжение таблицы 14

Вещество	Формула	ΔH_f° , кДж·моль ⁻¹	Константы Антуана		
			A	B	C _a
додекан	C ₁₂ H ₂₆	-290,9	7,2957	2463,739	253,88
изопропенилбензол	C ₉ H ₁₀	-112,9	6,3696	1680,13	219,6
крезол	C ₇ H ₈ O	-158	6,6329	1856,356	199,07
ксилидин	C ₈ H ₁₁ N	-85,26	6,7578	2035,4	216,00
кумол	C ₉ H ₁₂	-21,5	6,0675	1461,643	207,56
мезитилен	C ₉ H ₁₂	-15,9	6,3584	1691,49	224,20
метиламинол	C ₆ H ₁₄ O	-344,2	7,5919	2174,869	257,78
метанол	CH ₄ O	-201,3	7,352	1660,45	245,80
метилацетат	C ₃ H ₆ O ₂	-409,1	6,1901	1157,63	219,73
метилбутират	C ₅ H ₁₀ O ₂	-485	6,2263	1338	214,34
метилгексан-2	C ₇ H ₁₆	-194,9	5,9981	1236,026	219,55
метилпентальдегид	C ₆ H ₁₂ O	-249,1	6,465	1519,1	223,65
метилпропионат	C ₄ H ₈ O ₂	-438,8	6,74	1667	273,00
метилпропилкетон	C ₅ H ₁₀ O	-258,6	6,9891	1870,4	273,20
метилформиат	C ₂ H ₄ O ₂	-349,8	6,4589	1206,148	239,02
метилциклогексан	C ₇ H ₁₄	-154,7	5,9518	1272,864	221,63
метоксиэтилацетат	C ₅ H ₁₀ O ₃	-573,6	6,2500	1447,037	196,10
муравьиная кислота	CH ₂ O ₂	-210,6	4,9927	765,889	154,55
м-ксилол	C ₈ H ₁₀	17,25	6,588	1906,8	234,9
нонан	C ₉ H ₂₀	-229	6,1777	1510,695	211,50
нониловый спирт	C ₉ H ₂₀ O	-387	5,8006	1276,626	123,10
метилциклопентан	C ₆ H ₁₂	-106,6	5,9877	1186,059	226,04

Продолжение таблицы 14

Вещество	Формула	ΔH_f° , кДж·моль ⁻¹	Константы Антуана		
			A	B	C _a
октан	C ₈ H ₁₈	-208	6,0939	1379,556	211,89
октаналь	C ₈ H ₁₆ O	-643,96	6,7024	1815,764	218,61
октановая кислота	C ₈ H ₁₆ O ₂	-565,3	5,2690	1014,81	72,77
октиловый спирт	C ₈ H ₁₈ O	-357	5,7209	1170	120,00
октилциклогексан	C ₁₄ H ₂₈	-295,6	6,6848	2213,668	209,50
пентан	C ₅ H ₁₂	-146,4	5,9720	1062,555	231,81
пентанол-2	C ₅ H ₁₂ O	-314,13	6,3504	1254,854	169,60
пиридин	C ₅ H ₅ N	140,6	6,007	1281,3	205,00
пиррол	C ₄ H ₅ N	63	6,4196	1501,563	210,40
пропаналь	C ₃ H ₆ O	-221,7	6,0657	1163,288	231,17
пропиламин	C ₃ H ₉ N	-101,5	6,3854	1243,947	235,88
пропилбензол	C ₉ H ₁₂	-7,9	6,2971	1627,827	220,49
пропилбутират	C ₇ H ₁₄ O ₂	-556,8	6,6514	1756,37	234,96
пропиленгликоль	C ₃ H ₈ O ₂	-499,9	8,640	3039	273,00
пропанол	C ₃ H ₈ O	-257,7	7,4420	1751,981	225,13
пропилформиат	C ₄ H ₈ O ₂	-417	5,9724	1126,539	203,46
пропилциклогексан	C ₉ H ₁₈	-193,3	6,0135	1461,715	207,99
пропилциклопентан	C ₈ H ₁₆	-148	6,0796	1438,79	222,23
пропилэтилкетон	C ₆ H ₁₂ O	-272	6,4469	1538,995	222,58
пропионовая кислота	C ₃ H ₆ O ₂	-466	7,839	2410	273,00
пропионовый ангидрид	C ₆ H ₁₀ O ₃	-289	4,944	810,31	108,74
стирол	C ₈ H ₈	155,6	7,0654	2123,057	272,99

Продолжение таблицы 14

Вещество	Формула	ΔH°_f , кДж·моль ⁻¹	Константы Антуана		
			A	B	C _a
тетрагидрофуран	C ₄ H ₈ O	-214	6,1200	1202,29	226,25
тетраметилбензол	C ₁₀ H ₁₄	-41,9	6,2418	1693,156	195,23
тетраметилгептан	C ₁₁ H ₂₄	-276,2	6,2872	1715,271	216,61
тетраметилпентан	C ₉ H ₂₀	-273,2	5,9536	1397,483	213,70
толуол	C ₇ H ₈	50,17	6,050	1328,171	217,71
тридекан	C ₁₃ H ₂₈	-311,5	7,0938	2468,91	250,31
триметилбензол	C ₉ H ₁₂	-15,9	6,4429	1791,164	227,84
триметилгексан	C ₉ H ₂₀	-254	5,9602	1324,049	210,74
уксусная кислота	C ₂ H ₄ O ₂	-437,3	7,1033	1906,53	255,97
уксусный ангидрид	C ₄ H ₆ O ₃	-328	6,274	1444,718	199,82
ундеканол	C ₁₁ H ₂₄ O	-422,5	5,6520	1250	100,00
фенилэтиловый эфир	C ₈ H ₁₀ O	-84	6,5277	1808,8	230,00
хлорбензол	C ₆ H ₅ Cl	51,4	6,3861	1607,316	235,351
цимол	C ₁₀ H ₁₄	28,8	6,6498	1893,381	232,66
этилацетат	C ₄ H ₈ O ₂	-442,9	6,2267	1244,95	217,88
этилбензол	C ₈ H ₁₀	29,9	6,3587	1590,66	229,58
этиленгликоль	C ₂ H ₆ O ₂	-453,8	8,1375	2753,183	252,00
этилтолуол	C ₉ H ₁₂	-1,6	6,4147	1732,11	228,10
этилформиат	C ₃ H ₆ O ₂	-371,2	6,1339	1123,943	218,25
этилциклогексан	C ₈ H ₁₆	-171,7	5,9953	1384,036	215,13

ТЕРМИНЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Вынужденное зажигание – это возникновение горения вследствие действия источника зажигания на малую долю холодной горючей смеси.

Возникновение горения – это быстрый переход медленной окислительно-обновленной реакции к мгновенному преобразованию исходных веществ в продукты реакции за счет самоускорения. Это превращение носит взрывной характер и сопровождается вспышкой или звуковым эффектом.

Высшая теплота сгорания – количество тепла, выделяющегося при полном сгорании единицы количества горючего вещества при условии, что горючая смесь и продукты горения находятся при стандартных условиях, а вода в продуктах горения находится в сконденсированном (жидком) состоянии.

Горение – сложный физико-химический процесс, основой которого является быстрая окислительно-восстановительная реакция, сопровождающаяся интенсивным выделением энергии в виде тепла и светового излучения.

Источник зажигания – это горящее или раскаленное тело, а также электрический разряд, которые имеют энергию и температуру, достаточные для зажигания (возникновение горения) других веществ.

Дым – это дисперсная система, состоящая из твердых и жидких частичек размером $10^{-5} \div 10^{-8}$ м (дисперсной фазы), зависших в газовой дисперсионной среде.

Йодное число ($J_{\text{и}}$) – это количество граммов йода, который присоединится в условиях специальных исследований (или по расчету) по месту ненасыщенных связей к 100 граммам масла.

Концентрационные пределы распространения пламени (КПП) (нижний или верхний) – такие наименьшая и наибольшая концентрации горючего пара или газа в воздухе, при которых достигается граничная для зажигания и распространения горения концентрации горючего компонента или воздуха, соответственно.

Коэффициент избытка воздуха (α) – коэффициент, который показывает, во сколько раз количество воздуха, который действительно поступает в зону горения, отличается от теоретически необходимого количества воздуха для полного сгорания горючего вещества.

Минимальная энергия зажигания E_{min} газа, пара или аэрозоля данного вещества в воздухе – это наименьшая энергия конденсатора, при разряде которого через воздушный промежуток возникает искра, которая зажигает стехиометрическую смесь данного вещества с воздухом с вероятностью 0,01.

Низшая теплота сгорания вещества – количество тепла, выделяющегося при полном сгорании единицы количества горючего вещества при условии, что горючая смесь и продукты горения находятся при стандартных условиях, а вода, входящая в состав продуктов горения, находится в газообразном состоянии.

Пламя – это газовый объем, в котором происходят все процессы, которые связаны с подготовкой горючей смеси к горению, и сам процесс горения.

Продукты горения – это газообразные, твердые и жидкие вещества, образующиеся при взаимодействии окислителя с горючим веществом в процессе горения.

Самовозгорание – процесс возникновения горения за счет самонагревания системы вследствие накопления тепла внутри самой системы под влиянием внутренних экзотермических процессов при благоприятных условиях и отсутствии источника зажигания.

Самонагревание – это повышение температуры системы за счет превышения скорости тепловыделения в системе вследствие протекания экзотермических процессов над скоростью теплоотдачи от системы в окружающую среду.

Самовоспламенение – это процесс возникновения горения в результате резкого повышения скорости экзотермических реакций окисления, возникающий под действием внешнего нагревания всей горючей системы до критической температуры [1], [6], [10], [11].

Стандартная температура самовоспламенения – наименьшая температура, определенная стандартным методом, до которой должна быть нагрета наиболее горючая смесь пара с воздухом, для возникновения горения без внесения постороннего источника зажигания.

Стандартная теплота образования вещества ΔH_f^0 – теплота реакции, в которой при стандартных условиях ($P = 101,3$ кПа, $T = 298$ К) образуется один моль сложного вещества из простых веществ, стойких при стандартных условиях.

Стехиометрическая концентрация – концентрация горючего вещества, соответствующая уравнению реакции горения.

Температура горения – температура, до которой нагреваются продукты горения во время их образования в зоне горения.

Температура зажигания – это критическая температура нагретого тела, при которой достигается равновесие между тепловыделением при окислении горючего вещества в пристенном слое горючей смеси и теплоотдачей в окружающую холодную смесь.

Температура самонагревания – наименьшая температура горючей системы, при которой возникает самонагревание вещества.

Температура самовоспламенения – наименьшая температура горючей системы, при которой в условиях специальных испытаний наблюдается ее самовоспламенение.

Тепловой эффект реакции – количество тепла, выделяющегося или поглощаемого системой во время протекания в ней необратимой химической реакции (химическая энергия превращается в тепловую) при условии постоянства температуры и объема или температуры и давления.

Теплота сгорания – количество тепла, выделяющегося при полном сгорании единицы количества горючего вещества с образованием продуктов полного

сгорания при условии, что начальные и конечные продукты находятся при стандартных условиях.

Температура зажигания – наименьшая температура жидкости, при которой после кратковременного действия источника зажигания устанавливается стойкое горение. При этой температуре интенсивность испарения жидкости и интенсивность выгорания паровоздушной смеси становятся равны.

Температура вспышки – наименьшая температура жидкости, при которой в условиях специальных испытаний над ее поверхностью накапливается пар, способный вспыхивать под воздействием кратковременного действия источника зажигания средней мощности, но без возникновения стойкого горения.

Температурные пределы распространения пламени (ТПРП) (нижний или верхний) – такие температуры жидкости, при которых над ее поверхностью образуется насыщенный пар в концентрации, соответствующей нижнему или верхнему концентрационному пределу распространения пламени.

ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

В

вещества пиррофорные, 166
время индукции, 129, 198

Г

горение, 7, сл.
- возникновение, 126, сл.
- энергетический баланс, 59
- материальный баланс, 10
- уравнение реакции, 15

Д

дым, 24
давление взрыва, 107

З

зажигание вынужденное, 128, 217

И

искра
- электрическая, 218
- короткого замыкания, 227
- фрикционная, 227, 229
источник зажигания, 217
избыток воздуха, 28

Й

йодное число, 172

К

коэффициент
- стехиометрический, 16
- избытка воздуха, 27
концентрация стехиометрическая, 17

Н

нагрузка пожарная, 79

О

объем воздуха, 29, 44, сл.
объем продуктов горения, 30, 45

П

пламя, 10, сл.
продукты горения, 24, сл.

Р

радикал, 170, 180
реакция
- автокаталитическая, 126
- горения
- цепная, 126
- тепловой эффект, 59, 184

С

самовозгорание, 128, 166, сл.
- микробиологическое, 167
- тепловое, 196
- химическое, 169
- при контакте с водой, 184
- при контакте с кислородом, 169
- физическое, 167
самонагревание, 136, 166, сл.
самовоспламенение, 128, сл.

Т

температура
- безопасная, 136, 202
- взрыва, 106
- горения, 80, сл.
- зажигания, 226, сл.
- самонагревание, 198
- самовоспламенение, 130, 153
теплота
- сгорания, 62, сл., 69, 73
- образования, 63, 66

Э

энергия
- внутренняя, 60
- зажигания, 218, сл.
энтальпия, 60

ЛИТЕРАТУРА

1. Процессы горения / Абдурагимов И.М., Андросов А.С., Исаева Л.К., Крылов Е.В. – М.: ВИПТШ МВД СССР, 1984. – 268 с.
2. Демидов П.Г., Шандыба В.А., Щеглов П.П. Горение и свойства горючих веществ. – М.: Химия, 1981. – 311 с.
3. Демидов П.Г., Саушев В.С. Горение и свойства горючих веществ. – М.: ВИПТШ МВД СССР, 1975. – 280 с.
4. Исаев С.И. Курс химической термодинамики. – М.: Высшая школа, 1986. – 232 с.
5. Монахов В.Т. Методы исследования пожарной опасности веществ. – М.: Химия, 1979. – 424 с.
6. Соколик А.С. Самовоспламенение, пламя и детонация в газах. – М.: Изд-во АН СССР, 1960.
7. Справочник “Пожаровзрывоопасность веществ и материалов и средства их тушения”/ Под редакцией А.Н. Баратова и А.Я. Корольченко, ч. I и II. – М.: Химия, 1990. – 650 с.
8. Баратов А.Н., Иванов Е.Н., Корольченко А.Я и др. Пожарная безопасность. Взрывобезопасность. Справочник. – М.: Химия, 1987. – 272 с.
9. Справочник химика / Под ред. Б.П. Никольского. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Химия, 1963. Т.1. – 1002 с.
10. Розловский А.Н. Основы техники взрывобезопасности при работе с горючими газами и парами. – М.: Химия, 1980. – 376 с.
11. Рябова І.Б., Сайчук І.В., Шаршанов А.Я. Термодинаміка і теплопередача у пожежній справі. – Харків: АПБУ, 2002. – 352 с.
12. Блинов В.И., Худяков Г.Н. Диффузионное горение жидкостей. – М.: РИСО АН СССР, 1961. – 210 с.
13. Таубкин С.И., Таубкин И.С. Пожаро- и взрывоопасность пылевидных материалов и технологических процессов их переработки. – М.: Химия, 1976. – 212 с.
14. Корольченко А.Я. Пожаровзрывоопасность промышленной пыли. – М.: Химия, 1986. – 242 с.
15. Абдурагимов И.М., Говоров В.Ю., Макаров В.Е. Физико–химические основы развития и тушения пожара. – М.: ВИПТШ МВД СССР, 1980. – 255 с.
16. Повзик Я.С., Клюс П.П., Матвейкин А.М., Пожарная тактика. – М.: Стройиздат, 1990. – 283 с.
17. Иванников В.П., Клюс П.П. Справочник руководителя тушения пожара. – М.: Стройиздат, 1987. – 288 с.
18. Драйздейл Д. Введение в динамику пожаров: Пер. с англ. – М.: Стройиздат, 1990. – 265 с.
19. Термогазодинамика пожаров в помещениях / Астапенко В.М., Кошмаров Ю.А., Молчадский И.С. и др. – М.: Стройиздат, 1988. – 295 с.
20. Романенко И.М., Кошмаров Ю.А., Башкирцев М.П. Термодинамика и

теплопередача в пожарном деле. – М.: ВИПТШ МВД СССР, 1977. – 415 с.

21. Ройтман М.Я. Основы противопожарного нормирования в строительстве. – М.: Стройиздат, 1969. – 480 с.

22. Зернов С.И. Расчетные оценки при решении задач пожарнотехнической экспертизы: Учебное пособие. – М.: ЭКЦ МВД России, 1992. – 88 с.

23. Баратов А.Н., Иванов Е.Н. Пожаротушение на предприятиях химической и нефтеперерабатывающей промышленности. – М.: Наука, 1979. – 120 с.

24. Иванов Е.Н. Противопожарная защита открытых технологических установок. – М.: Химия, 1986. – 190 с.

25. Таубкин С.И. Пожар и взрыв, особенности их экспертизы. – М., 1999. – 245 с.

26. Франк–Каменецкий Д.А. Диффузия и теплопередача в химической кинетике. – М.: Наука, 1967. – 220 с.

27. Юбилейный сборник трудов Всероссийского научноисследовательского института противопожарной обороны. – М.: ВНИИПО МВД России, 1997. – 287 с.

28. Шрайбер Г., Порст П. Огнетушащие средства: Пер. с нем. – М.: Стройиздат, 1975. – 260 с.

29. НАПБ Б.03.002–2007. Норми визначення категорій приміщень, будинків та зовнішніх установок пвибухопожежною та пожежною небезпекою. – К.: УкрНДПБ, 2007. – 40 с.

30. ГОСТ 12.1.044–89. ССБТ. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов. Номенклатура показателей и методы их определения. – М.: Изд-во стандартов, 1989. – 67 с.

31. ГОСТ 12.1.004–91. Пожарная безопасность. Общие требования. – М.: Изд-во стандартов, 1991. – 110 с.

32. ДНАОП 0.00-1.32-01. Правила устройства электроустановок. Электрооборудование специальных установок. – К.: ОАО «Киевпромэлектропроект», 2001. – 80 с.

33 Таубкин СИ., Баратов А.Н., Никитина А.С. Справочник пожароопасности твердых веществ и материалов. - М.: МКХ РСФСР, 1961.-125 с.

Подписано в печать 21.09.2019 г.
Формат 60x84/16
Печать RISO
Заказ № 33. Объем 8 п.л.
Тираж 50 экз.

Отпечатано в типографии Отдела организации научно-исследовательской и
редакционно-издательской работы
Кокшетауского технического института Комитета по чрезвычайным ситуациям
МВД Республики Казахстан
(020000, Республика Казахстан, Акмолинская область,
г.Кокшетау, ул. Акана-серэ, 136)
тел. 8(7162)25-58-95