

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ИВАНОВСКАЯ ПОЖАРНО-СПАСАТЕЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ ГОСУДАРСТВЕННОЙ
ПРОТИВОПОЖАРНОЙ СЛУЖБЫ МИНИСТЕРСТВА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ПО ДЕЛАМ ГРАЖДАНСКОЙ ОБОРОНЫ, ЧРЕЗВЫЧАЙНЫМ СИТУАЦИЯМ
И ЛИКВИДАЦИИ ПОСЛЕДСТВИЙ СТИХИЙНЫХ БЕДСТВИЙ»**

Т.В. ФРОЛОВА, Т.А. МОЧАЛОВА, О.Е. СТОРОНКИНА

ТЕОРИЯ ГОРЕНИЯ И ВЗРЫВА

практикум

Иваново 2020

УДК 54.01 + 614.8
ББК 24.54

Фролова Т.В., Мочалова Т.А., Сторонкина О.Е.

Теория горения и взрыва: практикум по специальности 20.02.04 «Пожарная безопасность» квалификация базовой подготовки «Техник». – Иваново: ФГБОУ ВО Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, 2020. – 45 с.

В практикуме приводится описание лабораторных работ, которые охватывают все разделы курса «Теория горения и взрыва». Практикум включает краткое описание основных особенностей возникновения, развития и прекращения горения на основе современных представлений о данных процессах.

Практикум предназначен для обучающихся по специальности 20.02.04 «Пожарная безопасность» квалификация базовой подготовки «Техник».

*Издается по решению Редакционно-издательского совета
Ивановской пожарно-спасательной академии ГПС МЧС России
(Протокол № 3 от 27.05.2020)*

Рецензенты:

Начальник адъюнктуры

*ФГБОУ ВО Ивановской пожарно-спасательной академии ГПС МЧС России
полковник внутренней службы, кандидат технических наук, доцент*

Д.А. Ульев

Заведующая кафедрой органической и физической химии

*ФГБОУ ВО Ивановский государственный университет
доктор химических наук, профессор*

Т.П. Кустова

ВВЕДЕНИЕ

Выполнение лабораторных работ по дисциплине «Теория горения и взрыва» направлено на совершенствование теоретической и практической подготовки будущего специалиста. Они проводятся с целью закрепления знаний обучающихся по основным темам дисциплины, контроля уровня усвоения полученных знаний и отработки практических умений и навыков при работе с лабораторным оборудованием.

Лабораторный практикум содержит семь работ. В каждой из которых приведены: цели, задачи, основные теоретические положения, описание и порядок проведения практической части работы. В конце каждой работы даны вопросы для самоконтроля, ориентирующие обучающихся в самостоятельной работе с учебной литературой, позволяющие систематизировать материал. Такая структура должна помочь в самостоятельной подготовке к выполнению лабораторной работы, способствовать осмысленному ее выполнению.

В приложение вынесены таблицы, справочные материалы общего характера и основные физико-химические свойства веществ, необходимые для выполнения расчетной части лабораторных работ.

Общие правила выполнения, оформления и защиты лабораторных работ

Накануне лабораторной работы необходимо повторить теоретический материал, изучить содержание и порядок выполнения предстоящих исследований, способ обработки полученных данных.

Теоретические основы каждой лабораторной работы изложены кратко, конспективно, учитывая тот факт, что теоретическая часть работы усвоена обучающимися на лекциях и при самостоятельной работе с учебной литературой.

Те обучающиеся, которые не изучили теорию, содержание и порядок проведения лабораторной работы, не допускаются к ее выполнению.

Перед началом выполнения лабораторных работ каждый обучающийся проходит инструктаж по охране труда, о чем делается запись в специальной ведомости.

При выполнении лабораторных работ необходимо соблюдать правила техники безопасности работы в лаборатории, поддерживать чистоту и порядок.

Отчеты по лабораторным работам оформляются в отдельной тетради для лабораторных работ. Каждый отчет должен включать в себя название работы, цели, задачи, перечень материально-технического обеспечения, теоретические основы работы, расчет необходимых параметров (где это необходимо), порядок выполнения работы (ход работы), схему лабораторной установки (при наличии), результаты (могут быть представлены в виде таблиц, графиков и т.п.) и выводы по результатам проведенных исследований.

Графики необходимо выполнять аккуратно карандашом, с обязательным обозначением осей координат.

Выводы по лабораторной работе представляют собой анализ ее основных результатов (какие наблюдаются закономерности изменения изучаемых параметров, причины различия в величине расчетного и экспериментально определенного показателя и др.).

Выполненная и оформленная лабораторная работа в обязательном порядке подлежит защите.

Защита лабораторной работы может проводиться в виде тестирования (компьютерного или бланкового) или индивидуального собеседования обучающегося с преподавателем по результатам работы по контрольным вопросам.

Лабораторная работа №1

Исследование структуры ламинарного диффузионного пламени

Цели работы:

1. Экспериментально установить наличие в ламинарном диффузионном пламени зоны горения и зоны горючих паров и газов.
2. Определить температуру пламени в зоне горения и зоне горючих паров и газов.

Задачи:

1. Опытным путем подтвердить теоретические положения о структуре пламени.
2. На основании наблюдений сделать выводы о различных зонах пламени и их температуре.

Оборудование: низкие фарфоровые тигли, горючая жидкость, спички, лучины.

Теоретическая часть

Вещества, которые при нагревании способны выделять горючие пары и газы, горят с образованием пламени.

Пламя представляет собой газовый объем, в котором протекает реакция горения.

Горение паров и газов может протекать как в кинетическом (быстром, взрывообразном) режиме, так и в диффузионном (более медленном). Основным режимом горения на пожарах является именно диффузионный.

На рисунке 1.1 показано строение диффузионного пламени.

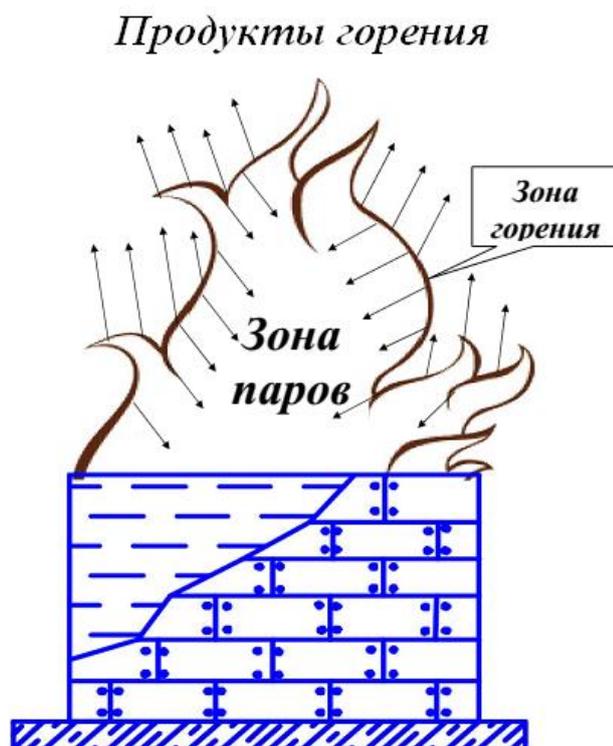


Рис. 1.1. Схема диффузионного пламени

Оно состоит из двух основных зон. Первая зона, в которой находятся горючие газы и пары, занимает больший объем пламени. Зона горения представляет собой очень тонкий слой (порядка 0,1-1,0 мм), однако именно в этой зоне выделяется вся тепловая энергия, запасенная в химических связях горючего вещества.

В зоне горючих паров и газов находятся продукты разложения, выделившиеся из горючего вещества при его нагревании. Горения здесь не происходит, так как весь кислород воздуха, диффундирующий к пламени, вступает в реакцию в зоне горения. Здесь температура намного ниже, чем в зоне горения. При этом она отличается в различных участках данной зоны. У поверхности горящего вещества температура паров равна температуре кипения (если горит жидкость) или температуре поверхности твердого вещества, через которую выделяются горючие газы. Поднимаясь от поверхности горящего вещества к зоне горения, пары и газы постепенно прогреваются. За счет нагрева большие молекулы горючих веществ разлагаются на более мелкие, но термоустойчивые. Непосредственно вблизи зоны горения пары и газы начинают окисляться за счет кислорода воздуха, который в небольших количествах проникает из зоны горения. То есть, в зоне горючих газов и паров протекают процессы, которые подготавливают их к горению.

В зоне горения, куда проникает кислород воздуха, происходит образование смеси горючих газов и паров с воздухом и ее сгорание. В процессе диффузии газообразного горючего и воздуха образуются смеси, отличающиеся по составу. Горение устанавливается в том месте, где концентрация горючего равна стехиометрической (т.е. там, где горение может происходить полно, без избытка горючего или воздуха).

Образующиеся в зоне горения продукты сгорания поступают (диффундируют) как в окружающий воздух, так и внутрь – в зону паров и газов.

На рисунке 1.1 видно, что продукты сгорания, смешиваясь с воздухом, образуют конвективный поток, движущийся вверх. За счет этого потока в верхней части пламени около зоны горения уменьшается концентрация кислорода. Тот же процесс наблюдается и в зоне паров и газов, где горючее по мере приближения к зоне горения все больше смешивается с продуктами горения. В результате данных процессов в верхней части пламени формируются условия, неблагоприятные для протекания процесса горения. Например, у жидкостей (бензол, керосин, нефть, бензин) или твердых веществ (стеарин, резина), содержащих в своем составе большое количество углерода, при горении в верхней части пламени образуется много сажи.

Отсюда следует, что горение веществ, содержащих в своем составе большое количество углерода, в условиях пожара сопровождается значительным недожогом.

Практическая часть

Все опыты необходимо проводить в вытяжном шкафу!

Опыт № 1 «Раскрытие пламени».

В низкий фарфоровый тигель налейте 2 мл горючей жидкости и подожгите с помощью спички.

Когда жидкость разгорится, снизу к краю тигля поднесите горящую лучинку. Вы увидите, что продукты горения от лучины огибают край тигля и поднимаются вверх. В том месте, где проходят продукты горения от лучины, кислород воздуха не поступает к пламени горячей в тигле жидкости, и зона горения здесь отсутствует. В образовавшемся отверстии в зоне горения вы увидите внутреннюю часть диффузионного пламени и толщину зоны горения.

Сделайте вывод о том, что собой представляет зона горения.

Опыт № 2 Качественное определение температуры различных зон пламени.

А) В низкий фарфоровый тигель диаметром 3-4 см налить горючую жидкость и поджечь.

Быстро поместить спичку в пламя таким образом, чтобы ее головка оказалась внутри. Вы увидите, что головка спички не загорится, а сама спичка, находящаяся в зоне горения, загорится.

Б) Возьмите чистый лист бумаги и быстро опустите сверху на пламя (на 3-4 секунды).

Снимите лист с пламени, как только он начнет желтеть.

На бумаге четко вырисовывается обугленное кольцо, внутри которого не обуглившийся круг бумаги.

На основании проделанных опытов сделайте вывод о температуре в зоне горения и в зоне паров и газов пламени.

Вопросы для самоконтроля

1. Что такое пламя? Из каких основных зон оно состоит?
2. В какую часть пламени следует вводить огнегасительные вещества, чтобы предотвратить действие на них высокой температуры?
3. К какому значению стремится концентрация кислорода в зоне горения?
4. Назовите способы передачи тепла из зоны горения.
5. Каким образом можно добиться большей полноты сгорания веществ в пламени?

Лабораторная работа №2

Определение температуры горения древесины

Цели работы:

1. Отработать практические навыки и умения по определению основных характеристик горения органических веществ.
2. Овладение методами расчета теплового баланса процесса горения твердых топлив.

Задачи:

1. Произвести расчёт температуры горения предложенных органических веществ.
2. Провести экспериментальные опыты.
3. Сделать вывод о различии между расчетной и действительной температурами горения.

Оборудование: вытяжной шкаф, оптический пирометр ОППИР-017, источник зажигания, твердое топливо (сосновые или березовые дрова).

Теоретическая часть

Химические реакции сопровождаются выделением или поглощением теплоты. При выделении теплоты реакция называется *экзотермической*, а при поглощении – *эндотермической*. Все реакции горения являются экзотермическими, а продукты горения относятся к экзотермическим соединениям.

Выделяемая (или поглощаемая) при протекании химической реакции теплота называется теплотой реакции. В экзотермических реакциях она положительна, в эндотермических – отрицательна. Реакция горения всегда сопровождается выделением теплоты. Теплотой горения Q_2 (Дж/моль) называется количество теплоты, которое выделяется при полном сгорании одного моля вещества и превращении горючего вещества в продукты полного горения. Моль является основной единицей количества вещества в системе СИ.

В технических расчетах чаще используется не теплота горения Q_2 , а теплотворная способность топлива Q (Дж/кг или Дж/м³). Теплотворной способностью вещества называется количество теплоты, которое выделяется при полном сгорании 1 кг или 1 м³ вещества. Для жидких и твердых веществ расчет проводится на 1 кг, а для газообразных – на 1 м³.

Знание теплоты горения и теплотворной способности топлива необходимо для расчета температуры горения или взрыва, давления при взрыве, скорости распространения пламени и других характеристик. Теплотворная способность топлива определяется либо экспериментальным, либо расчетным способами. При экспериментальном определении теплотворной способности заданная масса твердого или жидкого топлива сжигается в калориметрической бомбе, а в случае газообразного топлива – в газовом калориметре. С помощью этих приборов измеряется суммарная

теплота Q_0 , выделяющаяся при сгорании навески топлива массой m . Величина теплотворной способности Q_2 находится по формуле (2.1):

$$Q_2 = \frac{Q_0}{m}. \quad (2.1)$$

Если теплотворная способность топлива неизвестна, то ее можно рассчитать с помощью эмпирической формулы, предложенной Д.И. Менделеевым. Для этого необходимо знать элементарный состав топлива (эквивалентную формулу топлива), то есть процентное содержание в нем следующих элементов:

- кислорода (O);
- водорода (H);
- углерода (C);
- серы (S);
- золы (A);
- воды (W).

В продуктах сгорания топлив всегда содержатся пары воды, образующиеся как из-за наличия влаги в топливе, так и при сгорании водорода. Отработанные продукты сгорания покидают промышленную установку при температуре выше температуры точки росы. Поэтому тепло, которое выделяется при конденсации водяных паров, не может быть полезно использовано и не должно учитываться при тепловых расчетах.

Для расчета обычно применяется низшая теплотворная способность Q_n топлива, которая учитывает тепловые потери с парами воды. Для твердых и жидких топлив величина Q_n (МДж/кг) приближенно определяется по формуле (2.2) Менделеева:

$$Q_n = 0.339[C] + 1.025[H] + 0.1085[S] - 0.1085[O] - 0.025[W], \quad (2.2)$$

где в скобках указано процентное (масс. %) содержание соответствующих элементов в составе топлива.

В этой формуле учитывается теплота экзотермических реакций горения углерода, водорода и серы (со знаком «плюс»). Кислород, входящий в состав топлива, частично замещает кислород воздуха, поэтому соответствующий член в формуле (2.2) берется со знаком «минус». При испарении влаги теплота расходуется, поэтому соответствующий член, содержащий W, берется также со знаком «минус».

Сравнение расчетных и опытных данных по теплотворной способности разных топлив (дерево, торф, уголь, нефть) показало, что расчет по формуле Менделеева (2.2) дает погрешность, не превышающую 10 %.

Температура горения – это максимальная температура, до которой нагреваются продукты горения.

Различают калориметрическую, теоретическую, действительную и адиабатическую температуры горения.

Под калориметрической температурой горения понимается температура, до которой нагреваются продукты полного сгорания при следующих условиях:

1) все выделяющееся при горении тепло расходуется на нагрев продуктов сгорания (потери тепла равны нулю);

2) начальная температура воздуха и горючего вещества равны 273 К;

3) количество воздуха, поступающего для горения, равно теоретически необходимому (избыток воздуха равен нулю);

4) происходит полное сгорание. Калориметрическая температура горения зависит только от состава горючего вещества и не зависит от его количества.

Теоретической температурой горения называется та температура, до которой нагрелись бы продукты горения, при условии, что все выделившееся в ходе реакции тепло пошло на их нагревание, за исключением тепла, расходуемого на диссоциацию продуктов горения.

Действительной температурой горения называется та температура, до которой нагреваются продукты горения в реальных условиях, когда состав горючей смеси отличается от стехиометрического и имеет место рассеивание (потеря) тепла.

Под *адиабатической* температурой горения понимается температура, до которой нагреваются продукты горения при условии, что все выделившееся в результате реакции горения тепло идет на нагрев продуктов горения, но $\alpha \neq 1$.

Температура горения любого вещества не является постоянной величиной. Она зависит от условий горения (в замкнутом объеме или на открытом воздухе), от условий теплоотдачи, полноты сгорания топлива, коэффициента избытка воздуха и других факторов.

Для сравнения температуры горения T_2 разных веществ расчет ведется при строго одинаковых следующих условиях.

- Горючее и воздух вступают в реакцию горения при температуре $T = 0$ °С.
- Количество воздуха равно теоретически необходимому, то есть коэффициент избытка воздуха $\alpha = 1$.
- Горение происходит мгновенно до полного окисления (CO_2 , H_2O , SO_2) без образования промежуточных продуктов неполного горения (например, угарного газа CO).
- Вся выделенная теплота сообщается продуктам горения и расходуется исключительно на их нагревание.

Рассчитанная при этих условиях температура называется теоретической. Практически реализуемая температура горения T (при пожарах, при горении в печах, каминах, камерах сгорания и других технических устройствах) всегда ниже теоретической T_2 . Это связано с тем, что реальный процесс горения происходит с избытком воздуха, в условиях неполного сгорания. Кроме того, теплота горения частично расходуется на нагрев окружающей среды, а при температурах выше 1700 °С – на диссоциацию продуктов горения.

Например, при горении древесины, отличие T_2 от практически реализуемой температуры горения может достигать более 500 °С (табл. 2.1).

Таблица 2.1. Значения температур горения древесины

Древесина	Q , МДж/кг	T_z , °С	T , °С
Береза	13.25	1575	1069
Ель	13.45	1590	1080
Сосна	13.84	1605	1090

Расчет теоретической температуры горения. При определении теоретической температуры горения T_z предполагается, что вся выделившаяся теплота сообщается продуктам сгорания. Температура, до которой нагреются продукты сгорания, зависит от количества сообщаемой им теплоты, состава и количества продуктов сгорания и их удельной теплоемкости. Для расчета теоретической температуры горения T_z запишем уравнение (2.3) теплового баланса.

$$Q = V \cdot c_p (T_z - T_n), \quad (2.3)$$

где:

Q – теплотворная способность топлива, Дж/кг;

V – объем продуктов сгорания, образующихся при горении 1 кг топлива, м³/кг;

c_p – объемная удельная теплоемкость продуктов сгорания, Дж/(м³·град);

T_z – теоретическая температура горения, С;

T_n – начальная температура воздуха, С.

При горении в нормальных условиях ($T_n = 0$ °С) уравнение (2.3) примет вид:

$$Q = V \cdot c_p \cdot T_r. \quad (2.4)$$

Из (2.4) следует формула для расчета теоретической температуры горения:

$$T_r = \frac{Q}{V \cdot c_p}. \quad (2.5)$$

Поскольку продукты сгорания реальных топлив, как правило, состоят из разных газов, теплоемкость и плотность которых различны, то эта формула (2.4) записывается в следующем виде:

$$Q = V_1 \cdot c_{p_1} \cdot T_r + V_2 \cdot c_{p_2} \cdot T_r + \dots + V_n \cdot c_{p_n} \cdot T_r = T_r \sum_i V_i \cdot c_{p_i}. \quad (2.6)$$

Соответственно, формула (2.5) для расчета температуры горения с учетом (2.6) примет вид:

$$T_r = \frac{Q}{\sum_i V_i \cdot c_{p_i}}. \quad (2.7)$$

Практическая часть

Экспериментальное определение температуры горения осуществляется с помощью оптического пирометра ОППИР-017 (рис. 2.1). Оптический пирометр предназначен для измерения температуры тел, нагретых выше температуры начала видимого свечения по их спектральной (монохроматической) яркости,

наблюдаемой в лучах определенного цвета и оцениваемой по значению приводимой с нею в фотометрическое равновесие эталонной регулируемой яркостью нити электрической лампы накаливания.

Оптический пирометр показывает действительную температуру только тогда, когда излучение накаливаемого тела достаточно близко к излучению абсолютно черного тела. В остальных случаях он измеряет яркостную температуру, которая меньше действительной.

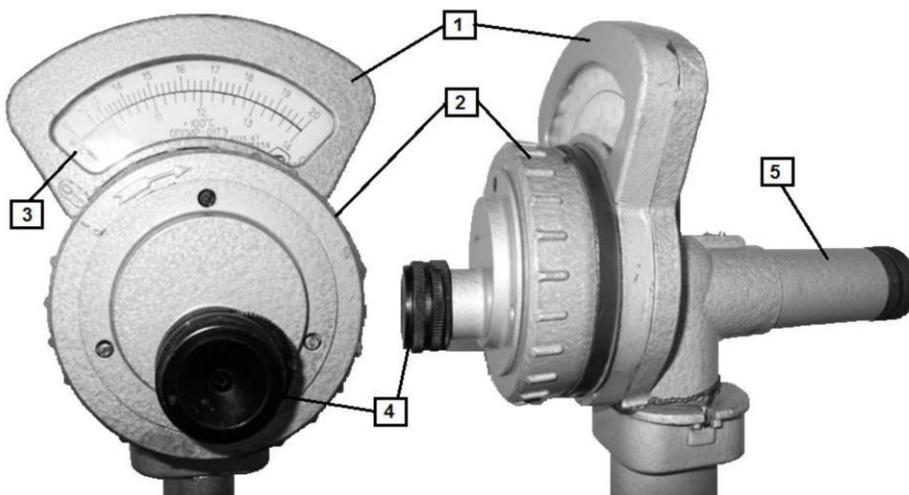


Рис. 2.1. Общий вид оптического пирометра ОППИР-017
1 - Корпус прибора, 2 - Кольцо реостата, 3 - Шкала,
4 - Объектив, 5 - Телескопическая труба

По мере нарастания температуры любого накаливаемого тела яркость его свечения увеличивается, а цвет изменяется. То есть, с изменением температуры процентное соотношение лучей различных длин волн, испускаемых накаливаемым телом и определяющих цвет излучения, изменяется.

Если сравнить различные удельные мощности излучения в лучах одной и той же длины волны (монохроматических), то эти мощности будут зависеть от температуры накаливаемых тел.

Мощность излучения реального тела при какой-либо температуре всегда меньше мощности излучения абсолютно черного тела при той же температуре. Оценивая температуру по монохроматической яркости, нельзя определить действительную температуру реального физического тела.

Вместо нее определяется меньшая – яркостная температура, до которой надо нагреть абсолютно черное тело для того, чтобы его монохроматическая яркость была равна соответствующей фактической яркости реального физического тела.

В оптический пирометр помещен эталон яркости, для которого установлена зависимость яркости от температуры. С яркостью эталона сравнивают яркость тела, температура которого измеряется.

Оптическая система пирометра позволяет рассматривать нить лампы на фоне изображения накаливаемого тела. Доводя яркость нити изменением тока накала до совпадения с яркостью накаливаемого тела, можно утверждать, что если равны монохроматические яркости, то равны и температуры. А так как темпера-

тура эталона всегда известна, то известна и измеряемая яркостная температура тела.

Опыт необходимо проводить в вытяжном шкафу!

Подготовка прибора к работе и определение температуры горения исследуемого вещества.

1. Провести внешний осмотр, проверив исправность всех частей пирометра.
2. Повернуть кольцо реостата против часовой стрелки до совпадения отметки «О» на реостате с отметкой «О» на корпусе прибора.
3. Подключить блок питания прибора к сети 220 В.
4. Направить телескоп пирометра на исследуемый объект (пламя горящего вещества) и, приложив глаз к окуляру, перемещать тубус объектива до тех пор, пока в поле зрения не появится четкое обратное изображение объекта измерения одновременно с нитью пирометрической лампы.
5. Медленным поворотом кольца реостата по часовой стрелке добиться такой яркости накала лампочки, чтобы она была равна яркости пламени горящего вещества. Если не удастся добиться совпадения яркости накала нити лампочки с яркостью пламени горящего вещества, следует установить поглощающий светофильтр и проделать все в той же последовательности.
6. По шкале прибора определить температуру горения вещества. Провести пять замеров температуры горения вещества. Результат занести в табл. 2.2.

Таблица 2.2. Температуры горения веществ

№ опыта	Наименование вещества	Расчетная температура горения, °С	Результаты замеров температуры горения, °С					Окончательный результат, $T_r \pm \Delta T$, °С
			1	2	3	4	5	

7. Провести математическую обработку результатов: рассчитать среднее арифметическое значение температуры горения, доверительный интервал отклонения случайной величины от измеренного значения, относительную погрешность.
8. Используя табл. 1-3 Приложения, рассчитать температуру горения исследуемого вещества, сравнить полученные значения с экспериментальными данными, сделать вывод.

Вопросы для самоконтроля

1. Что является причиной свечения пламени и от чего зависит характер свечения пламени?
2. Что называется температурой горения? Назовите ее виды.
3. Как влияет значение коэффициента избытка воздуха на значение температуры горения?

4. Какую температуру горения можно определить с помощью пирометра?
5. Для чего необходимо знать температуру горения?

Лабораторная работа №3

Исследование процессов химического самовозгорания

Цель работы:

экспериментально изучить механизм самовозгорания химически активных веществ.

Задачи:

1. Провести экспериментальные опыты.
2. Сделать выводы, подтвержденные наблюдениями.

Оборудование: видеофильм «Химическое самовозгорание», глицерин, перманганат калия, хромовый ангидрид, ацетон, этиловый спирт, натрий металлический, вода, кристаллизатор, пинцет, скальпель или острый нож, пипетки, фильтровальная бумага, фарфоровые тигли, фарфоровые ступки с пестом, металлический поддон, химические стаканы.

Теоретическая часть

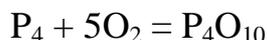
Среди химических веществ и соединений существует множество таких, которые обладают способностью самовозгораться при взаимодействии с кислородом воздуха, водой. К ним также относятся химические вещества, взаимодействие которых между собой вызывает сильный разогрев и в результате – горение.

Все самовозгорающиеся вещества разделяют на три группы:

- вещества, самовозгорающиеся при контакте с кислородом воздуха;
- вещества, самовозгорающиеся при взаимодействии с водой;
- вещества, самовозгорающиеся при взаимодействии друг с другом.

Вещества, самовозгорающиеся при контакте с кислородом воздуха.

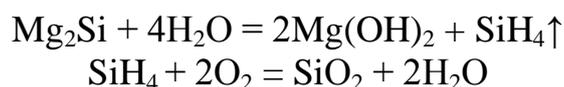
Белый (желтый) фосфор окисляется на воздухе при низкой температуре. Скорость его окисления такова, что выделяющееся в ходе реакции тепло превышает теплоотдачу, происходит быстрое саморазогревание, а затем горение. Горит ослепительным ярко-зеленым пламенем с выделением густого белого дыма.



Для предохранения от самовозгорания жёлтый фосфор хранится и перевозится под слоем воды (раствора хлорида кальция).

Фосфин (PH_3) является горючим газом, но самовозгораться не способен. Совместно с PH_3 выделяется некоторое количество жидкого дифосфина (P_2H_4), который способен самовозгораться на воздухе и может быть причиной воспламенения фосфина.

Силан (SiH_4) является чрезвычайно пожароопасным газом, который выделяется при взаимодействии с водой силицидов (соединений кремния с различными металлами, например, Mg_2Si , Fe_2Si). Силан самовозгорается на воздухе:



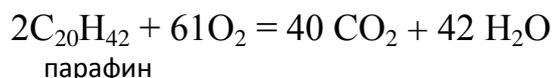
На воздухе могут самовозгораться порошки и пудры некоторых металлов (железо, цинк, алюминий, никель и др.). Наиболее распространенным из порошков металлов является алюминиевый, который применяется при изготовлении краски. При истирании металла в порошок в разы увеличивается площадь его удельной поверхности. В связи с этим возрастает и количество тепла, выделяющегося при окислении. Порошок способен самовозгореться при производстве. Чтобы это предотвратить порошок алюминия и алюминиевую пудру изготавливают в среде инертного газа, а затем перетирают с твердым жиром, чтобы каждая частица металла была покрыта слоем жира, предохраняющим ее от окисления.

Никель в компактном состоянии на воздухе стабилен, а порошок никеля быстро самовозгорается:



Скипидар также способен самовозгораться на воздухе, если им пропитаны волокнистые материалы (вата, мох), так как он способен окисляться кислородом воздуха при низких температурах.

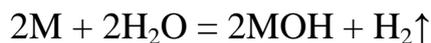
Кипящий медицинский парафин способен самовозгораться на воздухе:



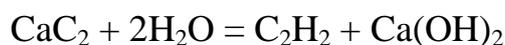
Вещества, самовозгорающиеся при взаимодействии с водой.

Активно взаимодействуют с водой и ее парами с большим выделением тепла щелочные металлы (калий, натрий, рубидий, цезий), карбиды и гидриды щелочных и щелочноземельных металлов, фосфиды кальция и натрия, негашеная известь, гидросульфид натрия и т.п.

Все щелочные металлы реагируют с водой, причем чем ниже металл расположен в группе периодической таблицы, тем активнее протекает реакция. Так литий реагирует спокойно, держась на поверхности воды, натрий часто воспламеняется, а калий, рубидий и цезий реагируют со взрывом. При взаимодействии этих металлов с водой выделяется водород и большое количество тепла. Водород нагревается за счет теплоты реакции и воспламеняется, вместе с ним горят и пары металла:



Карбид кальция твердое вещество серого цвета бурно реагирует с водой, выделяя горючий газ ацетилен:



На воздухе карбид кальция разлагается, взаимодействуя с парами воды, всегда имеющимися в воздухе, выделяя ацетилен и издавая чесночный запах.

Поэтому продолжительное хранение карбида кальция возможно лишь в герметически закрытых барабанах из листового железа.

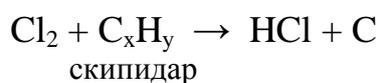
Негашеная известь (CaO) при гашении ее водой выделяет большое количества тепла, достаточного чтобы поджечь соприкасающиеся с ней горючие вещества и материалы.

Вещества, самовозгорающиеся при взаимодействии друг с другом.

В данном случае горение возникает, если вещество с высокой окислительной способностью соприкасается с горючим веществом.

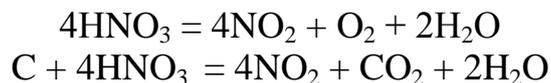
Среди газов сильными окислителями являются кислород и хлор.

Такие вещества как ацетилен, водород, метан, аммиак, красный фосфор, скипидар самовозгораются в парах хлора при обычной температуре. Скипидар, распределенный на каком-либо пористом веществе (бумаге, ткани, вате), самовозгорается в хлоре:



Газообразный кислород, выходящий из баллона под давлением, может вызвать самовозгорание минерального масла или других горюче-смазочных материалов, находящихся в вентиле баллона.

Среди жидкостей сильным окислителем, способным вызвать самовозгорание других веществ, является концентрированная азотная кислота (HNO₃). Молекулы азотной кислоты под действием света или нагревания легко распадаются с выделением кислорода, способным вызвать самовозгорание ряда веществ (хлопок, ткани, солома, древесные опилки и стружка, скипидар, этиловый спирт, уголь):



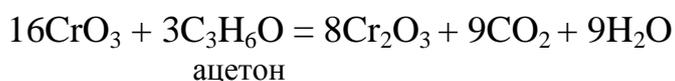
К жидким сильным окислителям относится также бром.

Твердыми окислителями, которые могут вызвать самовозгорание горючих веществ, являются перманганат калия, хромовый ангидрид, перекись натрия.

При взаимодействии перманганата калия (KMnO₄) с глицерином или этиленгликолем происходит самовозгорание последних. Глицерин (C₃H₅(OH)₃) самовозгорается в смеси с перманганатом калия через несколько секунд после смешения:



При попадании на хромовый ангидрид самовозгораются метиловый, этиловый и другие спирты, ацетон, уксусный, масляный, бензойный и пропионовый альдегиды, диэтиловый эфир, этилацетат, амилацетат, уксусная кислота.



Практическая часть

Задание 1. Просмотрите видеофильм «Химическое самовозгорание» и заполните таблицу 3.1, записав в соответствующие столбцы названия реагирующих веществ, наблюдения и уравнения реакций.

Сделать вывод о вероятности возникновения пожара в результате химического взаимодействия веществ, предложить возможные способы профилактики и тушения возгораний, вызванных различными видами химического самовозгорания.

Таблица 3.1. Классификация веществ по их способности к химическому самовозгоранию

Вещества, самовозгорающиеся при контакте с водой	Вещества, самовозгорающиеся при контакте с окислителями	Вещества, самовозгорающиеся при контакте с кислородом воздуха
	<p>Пример заполнения:</p> <p>1. Взаимодействие брома с алюминием.</p> <p>При контакте алюминиевой фольги с бромом, алюминий раскаляется и быстро сгорает желтым пламенем, выделяются белые пары бромида алюминия:</p> $2Al + 3Br_2 = 2AlBr_3 + Q$	

Опыт 1. Взаимодействие перманганата калия с глицерином.

Опыт следует проводить в вытяжном шкафу!

В фарфоровой ступке размельчите 1 грамм кристаллов перманганата калия ($KMnO_4$), насыпьте его на лист фильтровальной бумаги. Набрав в пипетку глицерин, капните несколько капель на перманганат калия. Быстро сверните бумагу и положите ее в металлический поддон.

Через несколько секунд происходит самовозгорание глицерина, которое вызывает воспламенений и горение бумаги.

Если реакция по каким-либо причинам не начинается, или вы просто не дождались её начала, ни в коем случае не оставляйте смесь без присмотра, для уничтожения смойте все водой.

Опыт 2. Окисление ацетона хромовым ангидридом.

Опыт следует проводить в вытяжном шкафу!

На металлический поддон помещают 1 шпатель порошка хромового ангидрида. С помощью пипетки набирают ацетон и капают его на хромовый ангидрид. Начинается бурная реакция, сопровождающаяся появлением яркого бе-

лого пламени. При этом оксид хрома (VI) восстанавливается до оксида хрома (III), а ацетон окисляется до углекислого газа и воды.

Сделайте вывод о вероятности возникновения горения при взаимодействии сильных окислителей с горючими веществами. Сформулируйте правила совместного хранения применяемых в опытах веществ и материалов.

Вопросы для самоконтроля

1. Допускается ли тушение горящего белого фосфора водой, воздушно-механической пеной, песком?

2. Объясните почему в случае попадания карбида кальция в большой объем воды самовозгорания не происходит?

2. Почему алюминий в виде пластин не склонен к самовозгоранию, а порошок алюминия самовозгорается на воздухе при низких температурах?

3. Какие меры необходимо предпринять для предотвращения самовозгорания щелочных металлов в процессе их хранения?

4. Поясните почему пожары деревянных сараев, в которых хранилась негашеная известь, возникали практически всегда во время дождя или таяния снега?

5. Почему категорически не допустимо использовать одежду и рукавицы со следами масел, жиров, бензина, керосина и т.п. при работе с кислородными баллонами?

Лабораторная работа №4

Определение температуры вспышки горючих жидкостей в закрытом и открытом тигле

Цель работы:

изучить методику определения температуры вспышки горючих жидкостей на приборах закрытого и открытого типа.

Задачи:

1. Измерить температуру вспышки индивидуальной жидкости на приборе «Вспышка-А» в режимах закрытого и открытого тигля.
2. Объяснить различия полученных результатов.

Оборудование: автоматический регистратор температуры вспышки нефтепродуктов «Вспышка-А», горючие жидкости.

Теоретическая часть

Температура вспышки – наименьшая температура конденсированного вещества, при которой в условиях специальных испытаний над ее поверхностью образуются пары, способные вспыхивать в воздухе от источника зажигания; устойчивое горение при этом не возникает.

Температуру вспышки определяют в открытом тигле и в закрытом тигле на специально предназначенных для этих целей приборах.

Значения температур вспышки используют при оценке качества нефтепродуктов, классификации жидкостей по степени пожаровзрывоопасности, а также при категорировании производственных помещений по взрывопожарной и пожарной опасности.

По температуре вспышки ($t_{всп}$) жидкости делятся на легковоспламеняющиеся (ЛВЖ) и горючие (ГЖ). К ЛВЖ относятся жидкости с $t_{всп}$ в закрытом тигле не выше 61 °С или в открытом тигле не выше 66 °С. В свою очередь, ЛВЖ подразделяются по температуре вспышки на три разряда (табл. 4.1). *Горючая жидкость* – жидкость, способная самостоятельно гореть после удаления источника зажигания и имеющая $t_{всп}$ выше 61 (в закрытом тигле) или 66 °С (в открытом тигле).

Таблица 4.1. Классификация легковоспламеняющихся жидкостей

Разряд ЛВЖ	Наименование разряда ЛВЖ	Температура вспышки, °С	
		в закрытом тигле (з.т.)	в тигле открытом (о.т.)
I	Особо опасные	не выше -18	не выше -13
II	Постоянно опасные	от -18 до 23	от -13 до 27
III	Опасные при повышенной температуре	от 23 до 61 включит.	от 27 до 66 включит.

Типичными представителями особо опасных ЛВЖ (I разряд) являются: диэтиловый эфир, ацетон, бензины и др. Эти вещества обладают высоким давлением насыщенного пара при обычных температурах хранения. В жаркую погоду они создают довольно высокое давление внутри сосудов, что увеличивает опасность.

Постоянно опасные ЛВЖ (II разряд) – это бензол, этиловый спирт и др. Жидкости II разряда опаснее жидкостей I разряда, так как они при комнатной температуре способны создавать взрывоопасные смеси в закрытых сосудах.

К жидкостям III разряда – опасным при повышенной температуре воздуха ЛВЖ – относятся: скипидар, керосин, уайт-спирит и др.

Существуют два стандартных метода определения температуры вспышки: в открытом (ГОСТ 4333-87) и закрытом (ГОСТ 6356-75) тигле. При определении вспышки в открытом тигле часть образовавшихся паров улетает в воздух, и требуемое их количество, необходимое для вспышки, накапливается позднее, чем в закрытом тигле. Поэтому температура вспышки одного и того же нефтепродукта, определенная в открытом тигле, будет выше, чем в закрытом тигле.

Практически температуру вспышки измеряют на приборе «Вспышка- А» (рис. 4.1). Важнейшая особенность этого прибора - скорость и точность оценки качества нефтепродуктов.

Принцип действия регистратора основан на методе, заключающемся в нагреве пробы нефтепродукта в открытом или закрытом тиглях с установленной скоростью до вспышки паров нефтепродукта над его поверхностью и фиксацией температуры вспышки.



Рис. 4.1. Общий вид прибора «Вспышка - А»

Регистратор состоит из металлического корпуса, внутри которого находится блок нагревателя и поджига, выпрямительный блок, понижающий трансформатор, и блоков электроники и термостатирования. Блок нагрева и поджига в свою очередь состоит из разрядника высоковольтной искры, измерительной термопары, термопары фиксации момента вспышки, нагревателя, двигателя,

посредством которого осуществляется ввод и вывод тигля с пробой нефтепродукта в рабочую камеру, вкладышей для организации режима «открытый» и «закрытый» тигель.

На передней панели корпуса находятся клавиши управления и дисплей для отображения температуры нагрева и режима работы.

Практическая часть

Все опыты необходимо проводить в вытяжном шкафу!

Подготовка прибора к работе и определение температуры вспышки исследуемой горючей жидкости.

1. Провести внешний осмотр, проверив исправность всех частей регистратора.

2. Подключить регистратор шнуром питания в сеть и включить выключатель «СЕТЬ». На табло буквенно-цифрового индикатора «Информация» (БЦИ) появляется сообщение:

«Вспышка А» «ЗДРАВСТВУЙТЕ!»,

при этом каретка прибора (платформа с нагревателем) начинает движение в сторону открытия.

Как только каретка остановится в открытом положении, на БЦИ высвечивается информация:

*« *Главное меню* » «Выберите функцию»*.

Это исходное положение регистратора. В этом положении нажатием кнопки регистратора выбирают соответствующую функцию главного меню. Чтобы войти в программу нужной функции необходимо нажать кнопку «Пуск». При нажатии кнопки «Стоп» происходит возврат в исходное положение. Если при включении прибора на табло загорелись сегменты в произвольном порядке, необходимо выключить прибор и включить повторно через 30 сек.

3. Дать возможность регистратору прогреться в течение 10 мин.

4. Обезжирить и высушить тигель.

5. Исследуемое вещество перед испытанием перемешать в течение пяти минут встряхиванием в склянке, заполненной не более чем на 2/3 объема.

Исследуемые вещества, имеющие температуру вспышки ниже 37 °С, охладить до температуры, которая не менее чем на 17 °С ниже предполагаемой температуры вспышки.

6. Заполнить тигель исследуемым веществом до верхней риски так, чтобы верхний мениск точно совпадал с риской. При наполнении тигля выше риски избыток нефтепродукта удалить пипеткой или другим соответствующим приспособлением. Не допускается смачивание стенок тигля выше уровня жидкости.

7. Вставить тигель в нагреватель регистратора.

8. Произвести набор команды работы регистратора в следующей последовательности:

а) нажать клавишу «РЕЖИМ».

После нажатия на эту клавишу на БЦИ появляется информация:

« *Главное меню* » « -Режим- »

при этом необходимо нажать клавишу «ПУСК», после чего на БЦИ появляется информация:

« -Режим- » «Открытый тигель», если установлен режим работы в ОТ или:

« -Режим- » «Закрытый тигель», если ранее был установлен режим работы в ЗТ.

При необходимости изменить режим работы регистратора нажатием клавиши «РЕЖИМ» устанавливается необходимый режим, который индицируется нижней строкой БЦИ, после чего необходимо нажать клавишу «ПУСК» и на БЦИ появляется информация:

« *Главное меню* » « Выберите функцию »;

б) нажать клавишу « t °С всп».

После нажатия на эту клавишу на БЦИ появляется информация:

« *Главное меню* » «- T °С вспышки-»,

при этом необходимо нажать клавишу «ПУСК», после чего на БЦИ появляется информация:

« - T °С вспышки- » « Темп. = XXX град.», где XXX - предполагаемая температура вспышки испытуемого нефтепродукта в градусах Цельсия.

Если необходимо изменить температуру, то новое значение вводится с клавиатуры регистратора до тех пор, пока XXX не будет соответствовать необходимому значению, после чего необходимо нажать клавишу «ПУСК». При этом каретка регистратора начнёт движение в сторону закрытия, а на БЦИ появляется информация:

« - T °С вспышки- » « $T=VVV$ °С, Откр. t (Закр. t) », где VVV - текущая температура испытуемого нефтепродукта, а Откр. t (Закр. t) - информация об установленном режиме (п. 3);

в) Светодиод «НАГРЕВ» начнет мигать с некоторой скважностью. Скважность мигания зависит от подаваемой на нагреватель мощности и может меняться в процессе опыта.

ВНИМАНИЕ! Срабатывание звукового сигнала после начала движения каретки в сторону закрытия свидетельствует о плохой фиксации вкладыша на верхней крышке регистратора. Для устранения этого необходимо:

1) нажать два раза клавишу «СТОП»;

2) легким нажатием зафиксировать вкладыш на верхней крышке до упора;

3) нажать клавишу «ПУСК».

Отсутствие звукового сигнала будет свидетельствовать об устранении недостатка.

9. Дальнейшая работа регистратора вплоть до завершения опыта происходит автоматически и не требует присутствия оператора. Опыт завершится по

достижении температуры вспышки. В результате чего на БЦИ появится информация:

« **** Вспышка! **** » « $T = CCC \text{ } ^\circ\text{C}$, Откр. t (Закр. t) », где CCC - температура вспышки испытуемого нефтепродукта.

10. Результаты занести в таблицу 4.2.

Таблица 4.2. Результаты измерения температуры вспышки жидкости в зависимости от режима

№ п/п	Исследуемая жидкость	Температура кипения жидкости, $^\circ\text{C}$	Расчетное значение температуры вспышки, $^\circ\text{C}$	Значение температуры вспышки в режиме «закрытый тигель», $^\circ\text{C}$	Значение температуры вспышки в режиме «открытый тигель», $^\circ\text{C}$

11. Сделайте вывод о различии полученных результатов расчетного и экспериментального значений температуры вспышки исследуемой жидкости.

Вопросы для самоконтроля

1. Перечислите факторы, влияющие на процесс испарения жидкостей.
2. Как влияет на температуру вспышки скорость ее нагрева при испытании?
3. С позиций молекулярно-кинетической теории объясните влияние содержания влаги в жидкости на ее температуру вспышки.
4. Изменится ли температура вспышки при изменении концентрации кислорода в окружающей среде? Объясните природу явления.
5. Какие противопожарные мероприятия необходимо осуществлять по обеспечению пожарной безопасности определенных объектов защиты, основываясь на знаниях таких пожароопасных показателей веществ и материалов как температура вспышки.

Лабораторная работа №5

Исследование влияния природы твердых горючих материалов на скорость распространения пламени по их поверхности

Цель работы:

экспериментально изучить механизм распространения пламени по поверхности твердых горючих материалов.

Задачи:

1. Провести экспериментальные опыты.
2. Установить влияние природы твердого горючего материала на скорость распространения пламени по его поверхности
3. Сделать выводы, подтвержденные наблюдениями, о решающей роли скорости распространения пламени по поверхности твердого горючего вещества на развитие пожара.

Оборудование: образцы твердых горючих материалов, металлические поддоны, штативы, спиртовки.

Теоретическая часть

Самыми распространенными материалами как в быту, так и на производстве являются твердые вещества и материалы. В настоящее время наряду с материалами естественного происхождения все более широкое применение находят разнообразные твердые вещества, получаемые синтетически.

Несмотря на большую работу по огнезащите как естественных, так и особенно искусственных материалов, основная их масса относится к группе горючих. В этом кроется одна из причин большого количества пожаров твердых материалов и ущерба от них. Кроме того, актуальной проблемой последнего времени являются ландшафтные пожары естественных материалов, возникающие регулярно и на всех континентах. Поэтому изучение механизмов возникновения и развития горения твердых веществ и материалов является необходимым условием для целенаправленной деятельности противопожарной службы по предотвращению и ликвидации пожаров с наименьшим ущербом.

Горение подавляющего большинства твердых материалов является диффузионным. Превращение твердого вещества в продукты горения происходит в результате окислительно-восстановительной реакции в зоне горения пламени; при этом скорость протекания реакции ограничивается физическим процессом смешения с воздухом газообразных продуктов термического разложения твердой фазы.

Количественной характеристикой процесса распространения пламени по поверхности твердых веществ является линейная скорость.

Линейная скорость распространения пламени – это путь, пройденный фронтом пламени в единицу времени по поверхности вещества.

Распространение пламени по поверхности твердых веществ и материалов

осуществляется за счет передачи части тепла, выделяющегося в зоне горения пламени, к поверхности горящего материала путем излучения, конвекции и теплопроводности.

Прогрев участков поверхности, расположенных перед фронтом пламени, приводит к разложению (пиролизу) прилегающего к зоне горения твердого вещества с образованием летучих (газообразных) продуктов (рис. 5.1). Выделяющиеся летучие продукты пиролиза перемешиваются с окружающим воздухом. В результате образуется гомогенная смесь. Как только концентрация горючих компонентов достигает значения нижнего концентрационного предела распространения пламени, смесь воспламеняется от пламени и сгорает. Затем процесс повторяется, то есть пламя будет распространяться по поверхности твердого горючего материала до тех пор, пока не охватит всю свободную верхнюю поверхность материала.

Таким образом, процесс распространения пламени по твердым материалам характеризуется следующими признаками:

- скорость перемещения фронта пламени равна скорости образования горючей (выше нижнего концентрационного предела) смеси над поверхностью материала;
- горение на передней кромке пламени (носике) всегда протекает в кинетическом режиме, т.е. горит предварительно перемешанная смесь горючего и окислителя.

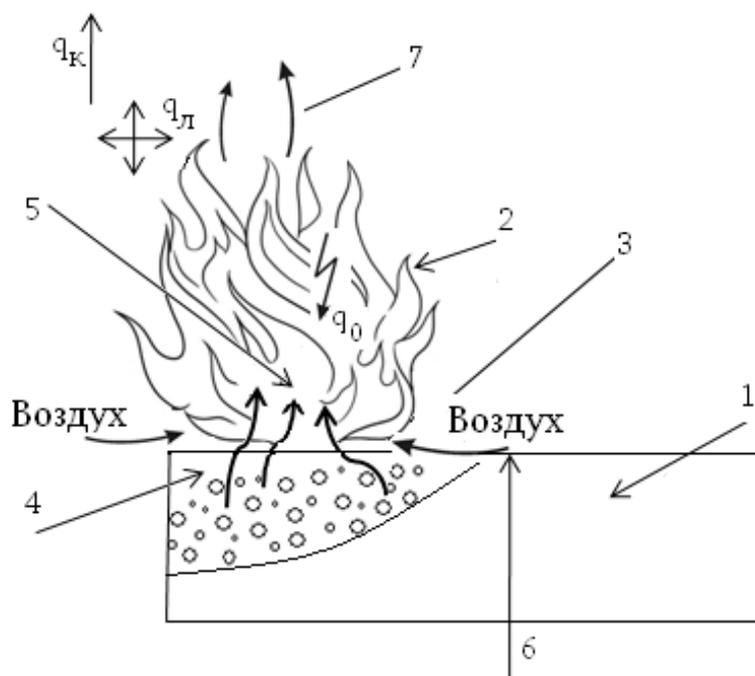


Рис. 5.1. Схема распространения пламени по поверхности твердого материала. 1 - исходный образец; 2 - зона диффузионного горения; 3 - зона кинетического пламени (носик); 4 - зона газификации твердого материала; 5 - зона газообразных продуктов разложения; 6 - зона разложения твердого материала перед фронтом пламени; 7 - продукты горения

Распространение пламени является одним из важнейших показателей пожарной опасности твердых веществ. Этот показатель определяется

экспериментально по ГОСТ 12.1.044-89.

Индекс распространения пламени J – условный безразмерный показатель, характеризующий способность веществ воспламеняться, распространять пламя по поверхности и выделять теплоту.

Этот показатель применяется для классификации строительных материалов, лакокрасочных полимерных покрытий, тканей, пленок:

$J=0$ - не распространяют пламя;

$0 < J < 20$ - медленно распространяют пламя;

$J > 20$ - быстро распространяют пламя

На реальных объектах находится много разнообразных твердых горючих материалов, поэтому определить или рассчитать предполагаемую скорость распространения пламени невозможно. В этом случае для проведения пожарно-технических расчетов используют усредненные данные, которые были получены на основе результатов экспериментальных исследований, а также наблюдений на реальных пожарах (табл. 5.1).

Таблица 5.1. Скорость распространения горения на реальных объектах

Объекты	Скорость распространения пламени, u, м/мин
Административные здания	1,0-1,5
Библиотеки	0,5-1,0
Жилые дома	0,5-0,8
Коридоры и галереи	4,0-5,0
Склады	до 4,0

Как видно из таблицы, скорости распространения пламени по твердым горючим материалам очень высоки. Это значит, что за время прибытия пожарных подразделений на пожар в течение 4-5 минут, пожар в помещениях, например, жилых домов может распространиться в радиусе около 5 м от очага, т.е. на площади до 70 м². Именно высокой скоростью распространения огня обусловлено категорическое требование для любого лица немедленно сообщить в пожарную охрану об обнаружении загорания и только потом уже приступить к борьбе с огнем подручными средствами.

Влияние некоторых условий горения на скорость процесса распространения пламени

Влияние вида материала. На скорость распространения пламени оказывают влияние физико-химические свойства материала такие как теплопроводность, теплоемкость, плотность, тепловой эффект пиролиза и др.

Скорость распространения пламени обратно пропорциональна теплоемкости, плотности и теплопроводности вещества. Поэтому пенопласты и другие твердые горючие материалы с низкой плотностью очень быстро распространяют пламя по своей поверхности, чем увеличивают площадь пожара и ускоряют его развитие.

Влияние влажности материала. С увеличением влажности горючего материала скорость распространения пламени снижается. Это связано главным образом со значительными затратами тепла на испарение влаги из поверхностных слоев материала, вследствие чего скорость пиролиза вещества замедляется. Кроме того, пары воды, поступая в пламя, снижают его температуру и излучательную способность.

Влияние ориентации образца в пространстве. Поверхность горючих твердых материалов может находиться под различным углом по отношению к горизонту.

При направлении движения пламени сверху вниз скорость распространения пламени минимальна. При увеличении положительного угла наклона (направление движения пламени снизу-вверх) свыше $10-15^\circ$ скорость распространения пламени резко возрастает. При этом также происходит наклон факела пламени к поверхности горючего вещества. Таким образом, при распространении пламени снизу-вверх возрастает теплопередача от зоны горения к поверхности твердого материала за счет конвекции.

Влияние скорости и направления воздушных потоков (ветра). При увеличении скорости ветра в направлении, совпадающем с направлением распространения пламени, скорость сначала возрастает линейно, а затем в соответствии со степенной и даже экспоненциальной зависимостью. В данном случае механизм влияния ветра аналогичен механизму влияния угла наклона образца.

Поток воздуха, направленный против движения пламени, оказывает двойное влияние на скорость распространения пламени. При малых скоростях движения воздуха определяющее влияние оказывают интенсификация смешения продуктов с кислородом воздуха и появление ламинарных вихрей, и скорость распространения пламени увеличивается. При дальнейшем увеличении скорости ветра начинает преобладать эффект аэродинамического торможения и охлаждения поверхности образца, и скорость распространения пламени уменьшается вплоть до его срыва.

Влияние геометрических размеров горючего образца. Основное влияние на скорость распространения пламени оказывает толщина образца. Различают термически толстые и термически тонкие образцы. Под термической толщиной понимают толщину прогретого слоя твердого материала перед фронтом пламени.

Если геометрическая толщина превышает термическую, такой образец называют термически толстым, если наоборот – термически тонким. Для термически толстых образцов характерно то, что температура со стороны образца, противоположной той, по которой распространяется пламя, равна его начальной температуре. А для термически тонких образцов температура поверхности стороны, противоположной горячей, выше начальной температуры образца.

С увеличением толщины термически тонких образцов скорость распространения пламени снижается главным образом за счет увеличения

теплопотерь, связанных с прогревом материала вглубь. Для термически толстых образцов скорость распространения пламени не зависит от их толщины. Действительно, если геометрическая толщина превышает термическую, то дальнейшее увеличение толщины не приведет к изменению характера распределения температуры по глубине материала перед фронтом пламени, и скорость горения останется неизменной.

Роль материала подложки. На практике, при наклейке различных защитных и декоративных покрытий на стены, при изоляции электрических проводов и т. п. горючий образец соприкасается с материалом (подложкой), теплофизические характеристики которого существенно отличаются от таковых для воздуха. Если подложка обладает коэффициентом теплопроводности большим, чем у горючего материала, то она усиливает отток тепла, поступающего от пламени к поверхности горючего, вглубь твердой фазы. Чем меньше толщина слоя горючего материала, тем выше скорость оттока тепла от его поверхности вглубь материала подложки. Это замедляет рост температуры поверхностного слоя и, следовательно, уменьшает скорость распространения пламени.

При достижении некоторой минимальной (предельной) толщины горючие покрытия уже не распространяют горение. Чем выше теплопроводность подложки, тем сильнее теплоотвод от поверхности горючего материала, тем при большей толщине горючего материала наступает прекращение горения.

Практическая часть

Все опыты необходимо проводить в вытяжном шкафу в отсутствие заметного движения воздуха!

1. Из испытуемых материалов вырезать по шесть образцов размером 35×170 мм, толщина образцов не должна превышать 10 мм.

2. Образец закрепить в горизонтальном положении на лабораторном штативе. Затем образец поджечь с края пламенем спиртовки. Зафиксировать время воздействия пламени спиртовки до воспламенения образца, результат занести в таблицу 5.2

Таблица 5.2. Результаты исследований

№ п/п	Вид образца	Номер образца	Продолжительность воспламенения, сек	Продолжительность самостоятельного пламенного горения, сек	Длина обугленного участка, мм	Скорость распространения пламени ($v_{пр}$), мм/с
1		1				
		2				
		3				
		4				

		5				
		6				
		Среднее значение				
2		1				
		2				
		3				
		4				
		5				
		6				
		Среднее значение				

3. После зажигания образца горелку убрать и фиксировать по секундомеру продолжительность самостоятельного горения и тления образца. Результат занести в таблицу 5.2.

4. Опыт повторить с каждым видом твердого горючего материала.

5. Сделать вывод о влиянии состава и свойств исследуемого материала на скорость распространения пламени по его поверхности.

Вопросы для самоконтроля

1. От каких факторов зависит скорость распространения пламени по поверхности твердых горючих материалов?

2. Является ли линейная скорость распространения пламени по поверхности постоянной величиной для одного и того же материала?

3. Как влияет на скорость распространения пламени угол наклона образца?

4. Как влияет влажность горючего материала на скорость распространения пламени по его поверхности? Объясните причины явления.

5. Как влияют теплофизические характеристики ТГМ (теплоемкость, теплопроводность, время зажигания) на скорость распространения фронта пламени?

Лабораторная работа №6

Определение массовой скорости выгорания жидкостей

Цель работы:

экспериментально изучить механизм выгорания жидкостей.

Задачи:

1. Провести экспериментальные опыты по определению массовой скорости выгорания жидкостей.
2. Сделать выводы, подтвержденные наблюдениями.

Оборудование: чашки Петри различного диаметра, этиловый спирт, металлический поддон, мерные цилиндры, ареометр, секундомер, лучина, источник зажигания, огнезащитная прокладка.

Теоретическая часть

Горение жидкостей сопровождается не только химической реакцией окисления горючего вещества кислородом воздуха, но и физическими явлениями (испарение, смешение горючих паров и газов с воздухом), без которых горение невозможно. Взаимодействие горючих паров с кислородом воздуха происходит в зоне горения, в которую непрерывно должны поступать горючие пары и воздух. Это возможно, если жидкость будет получать определённое количество тепла, необходимое для испарения.

В установившемся процессе горения ($T_{\text{пламени}} = \text{const}$) наблюдается равновесие между количеством вещества, сгоревшего в зоне горения, и массой пара, поступающего в пламя. Это определяет постоянную скорость испарения, а, следовательно, выгорание жидкости в течение всего процесса горения.

Различают две скорости горения жидкости – *массовую* и *линейную*.

Линейная скорость выгорания ($v_{\text{лин}}$) – высота слоя жидкости, выгорающая в единицу времени (6.1).

Массовая скорость выгорания ($v_{\text{мас}}$) – масса жидкости, выгорающая в единицу времени с единицы площади поверхности (6.2).

$$v_{\text{лин}} = \frac{h}{\tau}, \quad (6.1)$$

$$v_{\text{мас}} = \frac{m}{\tau \cdot S} = \frac{\rho \cdot V}{\tau \cdot S} = \rho \cdot v_{\text{лин}}, \quad (6.2)$$

где:

h – высота слоя сгоревшей жидкости, м;

τ – время горения, с;

m – масса сгоревшей жидкости, кг;

ρ – плотность жидкости, кг/м³;

S – площадь поверхности горения, м².

Скорость горения жидкостей непостоянна и изменяется в зависимости от начальной температуры, диаметра резервуара, уровня жидкости в резервуаре, скорости ветра и других факторов. С увеличением диаметра скорость сгорания

сначала уменьшается, а затем возрастает, пока не достигает определенного постоянного значения для данной жидкости. На скорость горения в малых горелках существенно влияют стенки, так как пламя, соприкасаясь с ними, нагревает верхнюю кромку до высокой температуры. От верхней кромки тепло теплопроводностью распространяется по всей стенке и передается жидкости. Этот дополнительный приток тепла со стороны стенки увеличивает скорость испарения жидкости. Увеличение скорости горения с увеличением диаметра связано с переходом от ламинарного режима горения к турбулентному. Этот переход сопровождается уменьшением полноты сгорания, а большое количество выделяющейся сажи способствует увеличению степени черноты пламени, что приводит к увеличению теплового потока от пламени. При турбулентном горении обеспечивается наиболее быстрый отвод паров от поверхности жидкости, увеличивается скорость испарения.

Скорость горения в больших резервуарах увеличивается с ростом диаметра незначительно. Считают, что скорость горения в резервуарах диаметром больше 2 м практически одинакова.

Сильный ветер способствует смешиванию паров с воздухом, повышению температуры пламени, в результате чего интенсивность горения увеличивается.

По мере снижения уровня жидкости в резервуаре увеличивается расстояние от пламени до поверхности жидкости, поэтому уменьшается приток тепла к жидкости. Скорость сгорания же постепенно уменьшается и при некотором критическом расстоянии поверхности жидкости от кромки борта может наступить самотушение. Это расстояние называется критической высотой; она увеличивается с увеличением диаметра резервуара.

Во время горения часть тепла, поступающего из пламени, расходуется на нагревание жидкости. Температура верхнего слоя жидкости с течением времени повышается, причем наиболее быстрое изменение температуры наблюдается в начальный период.

По истечении начального периода времени (10 мин) в слое жидкости устанавливается мало изменяющееся во времени распределение температуры. Характер распределения температуры зависит от рода жидкости и условий горения. При горении сложных по составу жидкостей – нефти и продуктов ее переработки – температура на поверхности равна средней температуре кипения, определяемой по кривой разгонки топлива. Температура на поверхности горящего автобензина лежит в пределах 90-110 °С, керосина 170-220 °С, дизельного топлива 230-240 °С, солярового масла 280-340 °С, нефти 130-350 °С.

Температура не одинакова во всех точках поверхности горячей жидкости. Вблизи стенок резервуара температура выше, чем в центре. Около стенок резервуара пламя расположено ближе к поверхности, чем к ее центральной части. Распределение температуры в глубину не одинаково для различных жидкостей.

Вскипание и выбросы в процессе горения жидкостей представляют большую опасность, так как внезапно выброшенная горящая жидкость может покрыть большую площадь вблизи очага горения вместе с находящимися на ней людьми, строениями и пожарной техникой.

Практическая часть

Все опыты необходимо проводить в вытяжном шкафу!

Подготовка к работе, определение плотности этилового спирта.

1. В мерный цилиндр налить этиловый спирт, примерно 50-100 мм.
2. Протереть ареометр сухой чистой тканью, чтобы не осталось жирных или грязных пятен. Перед погружением в жидкость прибор должен быть полностью сухим.
3. Привести температуру жидкости к рекомендуемой – 20 °С.
4. Аккуратно погрузить ареометр широкой нижней частью в жидкость посередине сосуда. Если бросить очень резко, прибор может удариться об дно и разбиться.
5. Подождать пока прибор стабилизируется на одном уровне.
6. Посмотреть результат. В зависимости от конструкции ареометра показания снимаются с верхнего края мениска или с нижнего как показано на рисунке 6.1. Этот момент обязательно указан в инструкции. При этом глаза лучше расположить ниже уровня жидкости, чтобы было хорошо видно эллиптическое основание мениска. Потом медленно поднимая голову, наблюдая, как сужаясь, эллипс превращается в прямую линию, определить результат.
7. Достать ареометр из мерного цилиндра, протереть, положить в футляр для хранения.

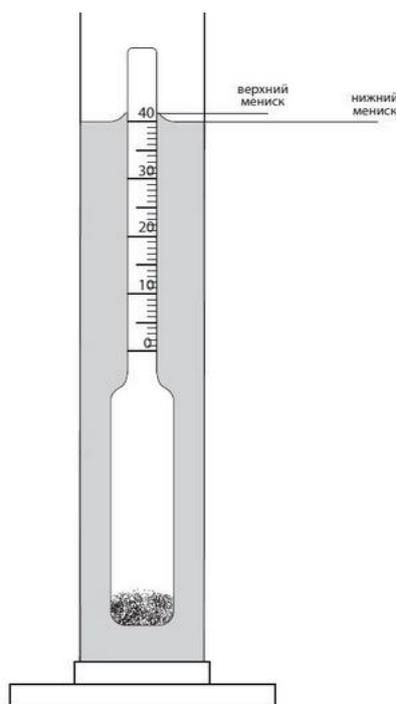


Рис. 6.1. Снятие показаний ареометром

8. Налить в мерный цилиндр этиловый спирт, зафиксировав объем жидкости.

9. В металлический поддон поместить чашку Петри, предварительно измерив диаметр. Данные занести в таблицу 6.1.

Таблица 6.1. Массовая скорость выгорания жидкости

Номер испытания	Показания регистрирующего прибора				Массовая скорость выгорания, кг/м ² ·с	Среднее значение скорости выгорания, кг/м ² ·с	Характер и режим горения
	d, мм	V, мл	Δl, мм	Δt, с			
1							
2							
3							
4							
5							
6							

8. В чашку Петри налить этилового спирта так, чтобы поверхность зеркала не доходила до краев чашки примерно на 4-5 мм.

9. Измерить высоту спиртового столба.

10. Поднести к чашке Петри горящую лучину и включить секундомер. Этиловый спирт быстро загорается и горит голубоватым, слабосветящимся пламенем.

11. Зафиксировать время выгорания жидкости и высоту оставшегося столба жидкости (если спирт не выгорел до конца) строго после окончания пламенного горения! Результаты занесите в таблицу 6.1.

12. Рассчитать массовую скорость выгорания этилового спирта.

13. Опыт повторить три раза. Данные занести в таблицу 6.1.

14. Рассчитать среднее значение скорости выгорания жидкости.

15. Повторить испытания по п. 8-14 изменив диаметр резервуара.

16. Оценить влияние диаметр резервуара на массовую скорость выгорания жидкости. Выводы записать в лабораторный журнал.

Вопросы для самоконтроля

1. Что произойдет со скоростью распространения пламени, когда начальная температура жидкости достигает температуры вспышки?

2. Перечислите факторы, влияющие на скорость процесса горения жидкости.

3. Что является движущей силой распространения процесса горения, и каков его механизм?

4. Чем опасны вскипание и выброс в процессе горения жидкости?

5. Дайте определение линейной и массовой скорости выгорания.

Лабораторная работа №7

Исследование стойкости воздушно-механической пены от различных факторов

Цель работы:

экспериментально изучить механизм разрушения воздушно-механической пены в зависимости от различных факторов.

Задачи:

1. Исследовать влияние концентрации пенообразующего раствора на стойкость пены.
2. Экспериментальным путем выявить зависимость стойкости воздушно-механической пены от температуры пенообразующего раствора.

Оборудование: мерные цилиндры, водонагреватель, секундомеры, пенообразователь, вода.

Теоретическая часть

Пена представляет собой дисперсную двухфазную систему, состоящую из ячеек, заполненных газом или паром и разделенных плёнками жидкости. Газ или пар, заполняющий ячейки, является дисперсной фазой, а жидкость – дисперсионной средой. Пена имеет ячеистую структуру, в которой пузырьки газа имеют сферическую или многогранную форму и размером до 10 см. При разрушении пены отделяется жидкая фаза, которая называется отсеком.

Структура пены. Структура пены определяется отношением объемов газовой и жидкой фаз в единице объема пены и характеризует механические и реологические ее свойства.

Если объем газовой фазы не превышает 74 %, то ячейки пены, заполненные газом, имеют сферическую форму. В таких пенах газовые пузырьки окружены оболочкой жидкости относительно большой толщины. С увеличением отношения $V_{\Gamma}/V_{\text{ж}}$ толщина пленки жидкости, разделяющая газовые объёмы уменьшается, а газовая полость утрачивает сферическую форму и трансформируется в многогранник. Пены, у которых отношение $V_{\Gamma}/V_{\text{ж}}$ составляет несколько десятков или даже сотен, имеют полиэдрическую (многогранную) форму (параллелепипеды, треугольные призмы, тетраэдры и т. д.). Со временем происходит утончение жидких оболочек и, как следствие, изменение структуры пены – старение. В процессе старения шарообразная форма ячеек переходит в многогранную.

Кратность пены (КП) – это отношение объема пены $V_{\text{п}}$ к объему жидкости $V_{\text{ж}}$, из которой она получена:

$$K_{\text{п}} = \frac{V_{\text{п}}}{V_{\text{ж}}} = \frac{V_{\Gamma} + V_{\text{ж}}}{V_{\text{ж}}}, \quad (7.1)$$

где:

V_{Γ} – объем газа, см³;

$V_{\text{ж}}$ – объем раствора, из которого получена пена см³.

Различают пены низкой кратности ($KП < 20$), средней кратности ($20 < KП < 200$) и высокой кратности ($KП > 200$).

Выбор кратности пены при тушении пожара связан с химическим составом пенообразователя (ПО), его огнетушащей эффективностью, а также условиями тушения (тип пожарного ствола, объект тушения). Огнетушащая эффективность пены низкой кратности из плёнообразующих фторсодержащих ПО близка к огнетушащей эффективности пены средней кратности из углеводородных ПО. Только применение пены низкой кратности позволяет использовать подслоный способ для тушения пожара углеводородного топлива в резервуаре.

Пена средней кратности (60-100) из углеводородных ПО используется в основном для тушения нефтепродуктов и других горючих жидкостей в резервуарах. Пену средней кратности также можно использовать не только для поверхностного, но и для объёмного тушения пожаров транспортных средств, в подвалах, кабельных каналах, в небольших по объёму помещениях, на чердаках, и т. п. Пена средней кратности повышенной устойчивости применяется при прокладке пенной аварийной посадочной полосы на аэродроме. Пена высокой кратности применяется для объёмного тушения.

Дисперсность пены ($D_{П}$) оценивается либо средним размером пузырька, либо распределением пузырьков пены по размерам. Чаще всего под дисперсностью понимают величину, обратную среднему размеру пузырьков пены, т.е.

$$D_{П} = \frac{1}{d_{cp}}, \quad (7.2)$$

$$d_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^{\infty} d_i \cdot N_i}{\sum N_i} \quad (7.3)$$

где:

d_i - диаметр пузырьков фракции i ;

N_i - число пузырьков фракции i с диаметром d_i ;

$\sum N_i$ - общее число пузырьков всех фракций.

Чем меньше средний диаметр пузырька пены, тем больше ее дисперсность.

Дисперсность пены характеризуется удельной поверхностью раздела фаз. Если пузырьки имеют одинаковые размеры, пена называется монодисперсной и, соответственно, если имеется i фракций или размеров пузырьков - полидисперсной. Согласно определению, пены могут быть высокодисперсными или низкодисперсными.

На дисперсность пены существенное влияние оказывают физико-химические свойства пенообразующего раствора (поверхностное натяжение, вязкость и т.д.), способ смешения фаз, конструкция генератора пены.

Дисперсный состав пены изменяется со временем в процессе старения. Наиболее интенсивные изменения в дисперсном составе пены протекают в начальный момент после ее образования. Это происходит за счет изменения поверхности раздела фаз в пене в результате разрушения пленок между ячей-

ками и их объединения. Отмечено, что с течением времени полидисперсность пены увеличивается.

Вязкость пены характеризует ее реологические свойства, т.е. способность к растеканию.

В отличие от жидкости пена обладает свойствами «твердого тела». Это проявляется в способности пены сохранять определенное время свою первоначальную форму. Вязкость пены зависит от многих факторов и, прежде всего, от природы пенообразователя, кратности и дисперсности.

Со временем в процессе старения пены вязкость ее сначала увеличивается, а затем в зависимости от типа пенообразователя может оставаться постоянной или уменьшаться. Высокой вязкостью обладают пены, имеющие меньшую скорость истечения жидкости из пленок.

Плотность пены зависит от соотношения жидкой и газовой фаз и может колебаться от половины плотности жидкой фазы до значений, близких к плотности газовой фазы. Пены, применяемые для тушения пожаров, имеют плотность 10 - 5 кг/м³ и меньше. Плотность пены является величиной переменной во времени и зависит от степени разрушения пены.

Теплопроводность пены. Передача тепла в пене происходит через пузырьки газа и через жидкие пленки между этими пузырьками. Из-за наличия газовой фазы теплопроводность пены довольно мала.

Электропроводность пены пропорциональна количеству содержащейся в ней жидкости.

Стойкость пены – это время существования (жизни) элемента пены (отдельного пузырька, пленки) или определенного её объема.

По времени «жизни» пены разделяются на короткоживущие (флотационные), долгоживущие (моющие, пожарные), безгранично живущие (отвержденные пены - вулканизированные, застеклованные).

Разрушение пены в обычных условиях происходит в результате истечения жидкости и разрыва пленок внутри пены. Преобладание того или другого из этих процессов при разрушении пены зависит от многих факторов. В стойких пенах пленки не разрушаются в течение 10-20 минут. В пенах высокой кратности («сухих») процесс истечения затруднен и разрушение обусловлено в основном разрывом пленок.

У пены средней кратности, т.е. пены с относительно толстыми прослойками между пузырьками оба механизма разрушения осуществляются последовательно: процесс начинается с истечения жидкости, заключенной между пузырьками (синерезис). Это приводит к быстрому утончению пленок, и, как следствие, к их разрыву.

Истечение жидкости из пены представляет собой чисто гидродинамическое явление. Из всего объема пены раствор, содержащийся в прослойках, стекает вниз, подпитывая нижележащие слои пены. Истечение заканчивается, когда вся излишняя жидкость будет удалена. На этой стадии существенным становится влияние капиллярных явлений. Под действием капиллярных сил, обусловленных различной кривизной отдельных участков пузырька, что, в свою

очередь, зависит от давления в соседних пузырьках, поверхностные слои пленок при истечении подвергаются упругим деформациям - растяжению или сжатию, что также приводит к разрушению пленки пузырька.

Скорость истечения жидкости из оболочки пузырьков, а, следовательно, и стойкость пены зависят от вязкости пенообразующего раствора. Исследования влияния вязкости пенообразующего раствора на стойкость пены показали, что максимальная стойкость пены не всегда соответствует максимальной вязкости раствора. Для повышения стойкости пены в раствор вводят стабилизаторы. Они могут быть растворимыми и нерастворимыми. Эффективными стабилизаторами пен являются карбоксиметилцеллюлоза, полиакриламид, поливиниловый спирт и др. Эти вещества, увеличивая вязкость, раствора, способствуют замедлению процесса истечения жидкости из пены.

Интенсивность разрушения пены характеризуется скоростью уменьшения ее объема. Поэтому косвенным показателем этого процесса может служить скорость выделения из пены жидкой фазы (отсека). Под стойкостью пены понимается время, в течение которого из пены выделяется 50% объема жидкости, из которой она получена. Эта величина является условной, так как при тушении пожара пена разрушается не только за счет тех факторов, которые рассматривались ранее (синерезис жидкой фазы и разрушение стенок пузырьков в результате их утончения под действием капиллярных сил), но также и под действием таких факторов, как смятие пены (силы трения при движении), термическое воздействие окружающей среды (контакт с горячей жидкостью или поверхностью, лучистый тепловой поток от пламени) и конвективных потоков.

Экспериментально установлено, что стойкость пены зависит в основном от температуры окружающей среды, дисперсности и толщины стенки пузырьков.

Стойкость пены зависит также от высоты пенного слоя. При увеличении высоты слоя пены уменьшается скорость выделения жидкой фазы, следовательно, стойкость пены увеличивается. При тушении пожара стойкость пены будет зависеть и от способа ее подачи.

Практическая часть

1. Приготовить 50 мл раствора пенообразователя заданной концентрации. Для этого необходимо отмерить шприцем нужное количество пенообразователя и поместить его в мерный цилиндр. Водой довести объем раствора до 50 мл. Измерить температуру полученного раствора. Записать результат в табл. 7.1.

2. Получить воздушно-механическую пену и измерить ее относительную стойкость. Для этого 20 раз интенсивно встряхнуть цилиндр с пенообразующим раствором. Сразу после 20-го встряхивания поставить цилиндр на стол и одновременно включить секундомер. Используя шкалу мерного цилиндра и секундомер измерить время выделения из пены 25 мл отсека. Записать результат в табл. 7.1.

3. Повторить процесс, описанный в п.п. 1-2 восемь раз. Записать результат в табл. 7.1.

4. После выполнения всех измерений с раствором данной концентрации тщательно вымыть цилиндр большим количеством воды. Приготовить раствор пенообразователя другой концентрации, выполнив действия, описанные в п. 1. Получить воздушно-механическую пену из растворов других концентраций и измерить ее относительную стойкость, выполнив действия, описанные в п. 2. Результаты занести в табл. 7.1.

Таблица 7.1. Время выделения из пены 25 мл отсека

Номер опыта	t, °C	Концентрация водного раствора пенообразователя, об. %						
		0,5	1,0	2,0	4,0	6,0	10	20
1								
2								
3								
4								
5								
6								
7								
8								
Среднее значение времени								

5. В водонагревателе нагреть воду до температуры ~ 40 °C. Выполнить действия, описанные в п. 2, приготовить пенообразующий раствор с концентрациями пенообразователя 1 % об. и 10 % об., используя подогретую воду. Термометром измерить температуру раствора. Определить стойкость пены (см. п. 3). Результаты занести в таблицу 7.2.

Таблица 7.2. Влияние температуры пенообразующего раствора на стойкость пены

Номер опыта	Температура раствора, °C	Концентрация пенообразователя, % об.		Время выделения из пены 25 мл отсека, сек
		1,0	10	
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				
8				

Обработка результатов

1. Определить относительную стойкость пены (S_{Π}). Для этого рассчитать среднее время выделения из пены половины пенообразующего раствора, как среднее арифметическое значение времен выделения 25 мл отсека в опытах 3, 4, 5 и 6.

2. По полученным данным построить график зависимости стойкости пены от концентрации пенообразующего раствора.

3. Объяснить влияние концентрации ПАВ в пенообразующем растворе на стойкость пены. Выводы записать в лабораторный журнал.

4. Оценить влияние температуры пенообразующего раствора на стойкость пены, объяснить полученные результаты. Выводы записать в лабораторный журнал.

Вопросы для самоконтроля

1. Пены: определение, способы получения.
2. Кратность пены. Классификация пен по их кратности.
3. Структура пены. Изменение структуры пены при ее старении.
4. Стойкость пены, ее показатели.
5. Дисперсность пены. Взаимосвязь кратности и дисперсности пены.

Список литературы

1. Федеральный закон Российской Федерации от 22 июля 2008 г. № 123-ФЗ «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности».
2. ГОСТ 12.1.044.- 89. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов. Номенклатура показателей и методы их определения. М.: Издательство стандартов, 1990.
3. *Батов Д.В.* Особенности описания показателей пожарной опасности углеводородов в рамках аддитивно-группового метода: температура вспышки и энтальпия испарения. / Д.В. Батов, Т.А. Мочалова, О.Е. Сторонкина // «Пожарная и аварийная безопасность». Интернет-журнал Ивановской пожарно-спасательной академии ГПС МЧС России, 2016 . № 1. www.pab.edufire37.ru.
4. Расчет основных показателей пожаровзрывоопасности веществ и материалов: Руководство. – М.: ВНИИПО, 2002. – 77 с.
5. *Таубкин С.И.* Пожар и взрыв, особенности их экспертизы / С.И. Таубкин. – М., 1999. – 600 с.
6. Теория горения и взрыва: практикум: Учебное пособие / В.А. Девисилов, Т.И. Дроздова, С.С. Тимофеева; под общ. ред. В.А. Девисилова. – М.: Форум, 2014. – 352 с.
7. Теория горения и взрыва: практикум: Учебно-методическое пособие / А.С. Андросов, И. Р. Бегишев, А. К. Беликов: – М.: Академия ГПС МЧС России, 2013. – 52 с.

Приложения

Таблица 1. Теплота образования ($\Delta H^{\circ}f$), низшая теплота сгорания (Q_H) и теплоемкость (C_p) некоторых веществ при 298,15 К

№ п/п	Вещество	($\Delta H^{\circ}f$), кДж/моль	Q_H , кДж/моль	Теплоемкость (C_p) при постоянном давлении Дж/(моль·К)
1	CH ₄ (г) - метан	74,85	802,32	35,715
2	H ₄ (г) - этин (ацетилен)	-226,75	1255,61	43,928
3	H ₂ (г) - этен (этилен)	-52,28	1322,98	-
4	C ₂ H ₆ (г) - этан	84,67	1427,87	52,65
5	C ₃ H ₆ (г) - пропен (пропилен)	-20,41	1926,46	-
6	C ₃ H ₈ (г) - пропан	103,9	2043,99	73,51
7	C ₄ H ₁₀ (г) - н-бутан	124,7	2658,54	97,45
8	C ₅ H ₁₂ (г) - пентан	146,4	3272,19	120,21
9	C ₆ H ₆ (ж) - бензол	-49,04	3135,62	136,77
10	C ₆ H ₁₂ (г) - циклогексан	123,1	3689	-
11	C ₇ H ₈ (ж) - толуол	- 8,08	3730,01	157,11
12	CO(г) - оксид углерода (II)	110,5	-	-
13	CO ₂ (г) - оксид углерода (IV)	393,51	-	37,15
14	CH ₄ O (ж) - метанол	238,7	683,49	81,6
15	CH ₂ O (г)-метаналь (формальдегид)	115,9	519,45	-
16	C ₂ H ₄ O (г) - этаналь (ацетальдегид)	166,0	1104,7	62,8
17	C ₂ H ₆ O (ж) - этанол	277,6	1234,94	111,46
18	C ₃ H ₆ O (ж) - ацетон	247,7	1658,35	75,3
19	C ₄ H ₁₀ O (ж) - диэтиловый эфир	273,2	2510,04	-
20	H ₂ O (г) - вода	241,84	-	-
21	HCl (г) - хлороводород	92,3	-	-
22	CH ₃ Cl (ж) - хлорметан	82,0	645,65	-
23	C ₆ H ₅ Cl (ж) - хлорбензол	-10,65	3431,37	145,6
24	SO ₂ (г) - оксид серы (IV)	296,9	-	-
25	CS ₂ (ж) - сероуглерод	-87,8	1075,11	-
26	CH ₄ ON ₂ (г) - мочеви́на	333,1	544,09	-
27	C ₅ H ₅ N(г) - пиридин	-140,2	2712,35	-

**Таблица 2. Изменение мольной энтальпии процесса горения
в интервале температур 273-3273 К**

№ п/п	Температура, К	Энтальпия, кДж/моль					
		O ₂	N ₂	воздух	CO ₂	H ₂ O	SO ₂
1	273	0	0	0	0	0	0
2	373	2,956	2,917	2,917	3,814	1,281	4,081
3	473	5,992	5,849	5,866	8,020	6,830	8,506
4	573	9,126	8,820	8,862	12,537	10,379	13,224
5	673	12,361	11,849	11,925	17,313	14,045	18,168
6	773	15,679	14,946	15,059	22,303	17,828	23,275
7	873	19,073	18,105	18,256	27,474	21,734	28,534
8	973	22,521	21,331	21,524	32,795	25,773	33,876
9	1073	26,020	24,616	24,843	38,238	29,938	39,286
10	1173	29,565	27,956	28,211	43,786	34,232	44,796
12	1273	33,143	31,337	31,622	49,442	38,649	50,322
11	1373	36,751	34,760	35,075	55,140	43,199	55,907
13	1473	40,392	38,221	38,561	60,923	47,808	61,492
14	1573	44,037	41,720	42,068	66,789	52,585	67,162
15	1673	47,724	45,252	45,629	72,655	57,403	72,797
16	1773	51,453	48,772	49,191	78,563	62,347	78,437
17	1873	55,182	52,375	52,794	84,554	67,333	84,135
18	1973	58,953	55,937	56,397	90,546	72,445	89,821
19	2073	62,766	59,540	60,001	96,580	77,599	95,557
20	2173	66,579	63,143	63,646	102,613	82,794	101,184
21	2273	70,392	66,789	67,333	108,647	88,074	107,013
22	2373	74,247	70,434	71,021	114,722	93,395	112,715
23	2473	78,102	74,121	74,708	120,840	98,758	118,451
24	2573	81,998	77,766	78,395	126,915	104,163	124,221
25	2673	85,937	81,454	82,124	133,033	109,631	130,024
26	2773	89,876	85,141	85,853	139,150	115,141	135,756
27	2873	94,015	89,004	89,331	145,326	119,398	141,513
28	2973	97,857	92,654	93,106	151,481	124,782	147,295
29	3073	101,834	96,437	96,789	157,561	130,343	152,985
30	3173	106,124	100,489	100,489	163,796	135,848	158,814
31	3273	110,113	103,828	104,205	169,946	141,161	164,667

**Таблица 3. Изменение объёмной энтальпии процесса горения
в интервале температур 273-3273 К**

№ п/п	Температура, К	Энтальпия, кДж/м ³					
		O ₂	N ₂	воздух	CO ₂	H ₂ O	SO ₂
1	273	0	0	0	0	0	0
2	373	131,8	130,1	130,1	170,1	150,6	181,4
3	473	267,2	260,9	261,6	357,7	304,7	377,9
4	573	407,1	393,6	395,4	559,7	463,0	587,0
5	673	551,4	528,7	532,1	772,6	626,8	824,6
6	773	669,3	666,6	672,0	925,1	786,2	1034,9
7	873	850,6	807,8	814,5	1225,6	969,5	1269,6
8	973	1004,7	951,9	960,3	1463,1	1149,7	1507,5
9	1073	1160,6	1098,2	1108,2	1706,2	1335,3	1746,4
10	1173	1319,0	1246,9	1258,7	1953,8	1527,2	1994,8
11	1273	1478,6	1398,2	1410,7	2205,2	1724,2	2237,4
12	1373	1639,5	1551,1	1564,9	2460,4	1926,5	2488,8
13	1473	1802,1	1705,3	1720,4	2718,5	2133,9	2735,2
14	1573	1965,1	1861,3	1877,5	2979,1	2345,5	2979,5
15	1673	2129,8	2010,0	2035,5	3241,4	2560,9	3238,0
16	1773	2295,7	2176,7	2194,7	3505,7	2781,3	3488,2
17	1873	2462,4	2335,5	2355,2	3771,4	3004,2	3747,5
18	1973	2630,5	2495,9	2515,7	4039,6	3231,7	4003,1
19	2073	2799,7	2656,4	2678,2	4307,3	3461,3	4261,2
20	2173	2969,4	2818,2	2840,4	4579,7	3693,5	4529,8
21	2273	3140,8	2979,9	3004,2	4847,8	3928,5	4667,6
22	2373	3311,7	3142,9	3167,6	5118,2	4166,1	5059,4
23	2473	3497,8	3306,3	3332,3	5392,5	4405,8	5337,2
24	2573	3659,1	3469,3	3497,4	5660,7	4667,1	5608,7
25	2673	3834,3	3633,1	3663,3	5933,0	4890,9	5892,8
26	2773	4009,8	3797,4	3828,8	6209,6	5136,5	6169,8
27	2873	4184,9	3953,9	3988,4	6487,4	5387,1	6460,1
28	2973	4368,9	4135,9	4156,5	6761,8	5639,3	6753,8
29	3073	4546,1	4304,4	4320,7	7033,3	5897,8	7050,9
30	3173	4729,2	4469,0	4484,9	7311,1	6159,3	7351,3
31	3273	4914,9	4634,5	4652,1	7589,7	6425,8	7655,1

Таблица 4. Состав древесины

№ п/п	Горючий материал	Элементный состав, %					
		С	Н	О	N	влага	зола
1	Дуб	46,08	5,5	38,18	1,14	7,0	2,1
2	Сосна	46,00	5,5	39,2	0,9	7,0	1,4

Оглавление

Введение.....	3
Общие правила выполнения, оформления и защиты лабораторных работ....	4
Лабораторная работа №1. Исследование структуры ламинарного диффузионного пламени.....	5
Лабораторная работа №2. Определение температуры горения древесины.....	8
Лабораторная работа №3. Исследование процессов химического самовозгорания.....	14
Лабораторная работа №4. Определение температуры вспышки горючих жидкостей в закрытом и открытом тигле.....	19
Лабораторная работа №5. Исследование влияния природы твердых горючих материалов на скорость распространения пламени по их поверхности.....	24
Лабораторная работа №6. Исследование стойкости воздушно-механической пены от различных факторов.....	30
Лабораторная работа №7. Определение массовой скорости выгорания жидкостей.....	34
Список литературы.....	40
Приложения.....	41

Фролова Татьяна Владиславовна
Мочалова Татьяна Александровна
Сторонкина Ольга Евгеньевна

**ТЕОРИЯ ГОРЕНИЯ И ВЗРЫВА
ПРАКТИКУМ**

по специальности 20.02.04 «Пожарная безопасность»
квалификация базовой подготовки «Техник»

Подготовлено к изданию 29.05.2020
Формат 60x84 1/16. Усл. печ. л. 2,9. Уч.-изд. л. 2,7. Заказ № 73
Отделение организации научных исследований
научно-технического отдела
Ивановской пожарно-спасательной академии ГПС МЧС России,
153040, г. Иваново, пр. Строителей, 33.