

**Министерство Российской Федерации  
по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям  
и ликвидации последствий стихийных бедствий**

---

**Академия гражданской защиты  
кафедра химии и материаловедения**

**А.Р. Манаева, Л.Р. Шарифуллина**

# **ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАЗВИТИЯ И ТУШЕНИЯ ПОЖАРОВ**

**Учебно-методическое пособие**

**Химки - 2020**

УДК 614.841.1

ББК 68.923

Авторы: А.Р. Манаева, Л.Р. Шарифуллина

Рецензенты:

Доцент кафедры пожарной безопасности  
Академии гражданской защиты МЧС России,  
канд.техн.наук, доц.

**Е.Б. Аносова**

доцент кафедры процессов горения УНК процессов горения и экологической  
безопасности Академии государственной противопожарной службы МЧС

России, канд. техн. наук

**А.К. Беликов**

Манаева А.Р. Физико-химические основы развития и тушения пожаров:  
учебно-методическое пособие / Манаева А.Р., Шарифуллина Л.Р.. – Химки:  
АГЗ МЧС России, 2020. – 160 с.

Учебно-методическое пособие является руководством для прохождения дисциплины «Физико-химические основы развития и тушения пожаров» студентами, обучающимися по заочной форме обучения. В пособии приведен теоретический материал по каждому изучаемому разделу в соответствии с программой курса, приведены решения типовых задач, даны задания для самостоятельного решения. Даны примерные тестовые задания для самопроверки по различным уровням подготовки. Приведены примерные вопросы к экзамену.

Пособие предназначено для обучающихся по специальности 20.05.01 Пожарная безопасность. Пособие может быть использовано в качестве дополнительной литературы обучающимися по направлениям подготовки 20.03.01, 20.04.01 – Техносферная безопасность.

© Академия гражданской защиты МЧС России, 2020

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение .....	4
1. Теоретическая часть контрольной работы.....	8
1.1. Требования к оформлению контрольной работы.....	8
1.2. Перечень тем реферативной части контрольной работы .....	12
1.3. Тестовые задания .....	18
1.3.1. Уровень А (репродуктивный) .....	18
1.3.2. Уровень В (продуктивный) .....	41
1.3.3. Уровень С (эвристический).....	44
2. Расчетная часть контрольной работы .....	53
2.1. Процессы горения различных веществ и материалов.....	54
Тема № 1. Общая характеристика процесса горения. Расчёт теплового эффекта процесса горения .....	54
Тема № 2. Горение газов и аэрозвесей. Расчёт объёмов воздуха и продуктов горения.....	61
Тема № 3. Горение жидкостей. Расчёт объёмов воздуха, продуктов горения, теплового эффекта и температуры процесса горения жидкостей .	70
Тема № 4. Горение твердых веществ и материалов .....	77
2.2. Практическое приложение теории горения в пожарном деле.....	85
Тема №5. Показатели пожарной опасности .....	85
Тема № 6. Параметры и классификация пожаров .....	94
Тема № 7. Открытые пожары .....	105
Тема № 8. Внутренние пожары .....	114
2.3. Теоретические основы прекращения горения .....	123
Тема № 9. Тепловая теория прекращения горения.....	123
Тема № 10. Огнетушащие вещества и механизм огнетушащего действия .	139
Тема № 11. Параметры прекращения горения.....	145
3. примерные Вопросы к экзамену.....	149
4. Примерные варианты экзаменационных задач .....	153
Глоссарий .....	156
приложение.....	159
Перечень рекомендуемой литературы .....	161

## ВВЕДЕНИЕ

В соответствии с учебным планом изучение дисциплины «Физико-химические основы развития и тушения пожаров» для обучающихся по специальности 20.05.01 – Пожарная безопасность предусмотрено на 2 курсе по заочной форме обучения (полный срок обучения).

Общая трудоемкость по дисциплине: 3 зачетные единицы (108 часов).

Количество аудиторных часов: 12, из них 4 часов – лекционные занятия, 2 часа – практические занятия, 6 часов – лабораторные работы.

Отчетность по дисциплине - экзамен.

Данное пособие содержит методические рекомендации обучающимся по успешному прохождению курса, выполнению всех контрольных заданий, подготовки к сдаче экзамена. Особенно актуальна представленная информация для студентов, обучающихся по заочной форме обучения.

*Цель дисциплины:* формирование у обучающихся научного мировоззрения о физических и химических явлениях и процессах, протекающих во время пожаров; современных представлений о методах прекращения пожаров, о свойствах средств тушения пожаров; развитие умения анализировать обстановку на пожаре, исходя из особенностей протекающих физико-химических процессов, прогнозировать на этой основе изменения обстановки в ходе тушения пожара; привитие у обучаемых навыков выбора способов и средств прекращения горения на пожаре в зависимости от параметров пожара, вида горючего и условий горения.

*Задачи изучения дисциплины:* освоение основных закономерностей развития открытых и внутренних пожаров, механизма формирования опасных факторов пожара, общих закономерностей прекращения горения на пожаре; развитие умения проводить анализ изменения параметров процесса горения и параметров пожаров в зависимости от различных факторов; привитие навыков выбора методов и средств прекращения горения на пожарах.

*Место дисциплины в структуре основной образовательной программы:*

Дисциплина относится к базовой части блока 1 «Дисциплины и модули». Содержание дисциплины базируется на теоретических обобщениях и практических выводах естественнонаучных и профессиональных дисциплин, изученных ранее студентами, а также на знаниях, полученных при изучении дисциплин «Химия», «Физика» и др.

Знания, полученные в ходе изучения дисциплины, являются необходимой основой для последующего изучения дисциплин: «Пожаротушение», «Прогнозирование опасных факторов пожара» и др.

Дисциплина занимает важное место в системе подготовки специалистов для МЧС России и способствует формированию компетенций, позволяющих организовать и выполнять мероприятия по предотвращению и тушению пожаров.

*Компетенции обучающегося, формируемые в результате освоения дисциплины (модуля):*

*ОК-1:* способность к абстрактному мышлению, анализу, синтезу;

*ОК-7:* способность к саморазвитию, самореализации, использованию творческого потенциала;

*ПК-1:* способность применять методику анализа пожарной опасности технологических процессов производств и предлагать способы обеспечения пожарной безопасности;

*ПК-4:* способность применять методы расчета основных параметров систем обеспечения пожарной безопасности технологических процессов;

*ПК-5:* способность определять категории помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности;

*ПК-8:* способность понимать основные закономерности процессов возникновения горения и взрыва, распространения и прекращения горения на пожарах, особенностей динамики пожаров, механизмов действия, номенклатуры и способов применения огнетушащих составов, экологических характеристик горючих материалов и огнетушащих составов на разных стадиях развития пожара.

*Основные дидактические единицы (разделы):*

## **Раздел I. Процессы горения различных веществ и материалов**

Тема № 1. Общая характеристика процесса горения

Тема № 2. Горение газов и аэрозвесей

Тема № 3. Горение жидкостей

Тема № 4. Горение твердых веществ и материалов

## **Раздел II. Практическое приложение теории горения в пожарном деле**

Тема № 5. Показатели пожарной опасности

Тема № 6. Параметры и классификация пожаров

Тема № 7. Открытые пожары

Тема № 8. Внутренние пожары

## **Раздел III. Теоретические основы прекращения горения**

Тема № 9. Тепловая теория прекращения горения.

Тема № 10. Огнетушащие вещества и механизм огнетушащего действия.

Тема № 11. Параметры прекращения горения.

*В результате изучения дисциплины обучающийся должен:*

**Знать:** основные показатели пожарной опасности веществ и материалов; общие закономерности развития открытых и внутренних пожаров; механизмы формирования опасных факторов пожара; параметры, определяющие динамику пожара; общие закономерности прекращения горения на пожарах; параметры процессов прекращения горения на пожарах и принципов их оптимизации; номенклатуру, способы применения и механизмы действия огнетушащих составов.

**Уметь:** проводить анализ изменения параметров процесса горения и параметров пожаров в зависимости от различных факторов; определять параметры прекращения горения различными огнетушащими веществами, выбирать оптимальные способы их подачи в зону горения; проводить поиск, обработку и анализ информации для решения практических задач.

**Владеть:** основными способами расчета параметров прекращения пожара; основными приемами выбора средств тушения пожаров и способов их подачи в зону горения.

Методические указания по дисциплине «Физико-химические основы развития и тушения пожара» предназначены для студентов специальности 20.05.01 «Пожарная безопасность» заочной формы обучения.

Одним из важных этапов является представление контрольной работы. Предлагаемая контрольная работа состоит из двух частей: теоретической (ответы на вопросы по одному из трех разделов программы дисциплины) и расчетной. Подробно изложены технические требования к оформлению реферативной части. К расчетной части прилагается подробный алгоритм решения и необходимые справочные данные.

Образец оформления титульного листа представлен в приложении 1.

Контрольная работа состоит из двух частей: *1 часть* – теоретическая, *2 часть* – расчетная.

Для допуска к экзамену студент должен выполнить все задания теоретической и расчетной частей в соответствии с вариантом. Номер варианта для всех заданий соответствует номеру фамилии обучающегося в журнале учебной группы.

# 1. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЫ

## 1.1. Требования к оформлению контрольной работы

Формат листа: А4 (210\*297 мм), поля: сверху 20 мм, снизу 20 мм, слева 20 мм, справа 15 мм.

Шрифт – Times New Roman, кегль – 14, полуторный интервал, отступ первой строки – 1,25 см.

Рисунки должны быть качественными, четкими, все надписи должны хорошо просматриваться (шрифт Times New Roman).

Редактор формул – Math Type Equation (предпочтительно версия 6.0), шрифт – Times New Roman, переменные – курсивом, греческие – прямо, русские – прямо. *Редактор формул – Math Type Equation*: Вставка-объект- Microsoft Equation 3.0 и выше.

Контрольная работа состоит из двух частей. *1 часть* – теоретическая, содержит задания реферативного и тестового типа. *2 часть* – расчетная, обучающемуся необходимо решить задачу по каждой теме дисциплины в соответствии со своим вариантом.

Текстовая часть контрольной работы должна быть изложена грамотно, с применением научных и технических терминов. Текст печатается в редакторе MS Word на одной стороне белой бумаги формата А4.

Объем реферативной части первого задания должен составлять 10-15 страниц печатного текста без приложений. В работе должно быть использовано от 4 до 6 источников информации (учебники, учебные пособия, научные труды, интернет-ресурсы). В тексте реферата обязательно наличие ссылок на источники используемой литературы в порядке упоминания в тексте или алфавитном порядке. Не менее 50 % источников литературы должны быть не старше 5 лет.

Страницы нумеруются, начиная с титульного листа, на котором номер страницы не ставится. Номер страницы ставится внизу страницы.



Иллюстрации (таблицы) следует нумеровать арабскими цифрами сквозной нумерацией. Если рисунок (таблица) один, то он обозначается «Рисунок 1». Допускается нумеровать иллюстрации (таблицы) в пределах раздела. В этом случае номер иллюстрации (таблицы) состоит из номера раздела и порядкового номера иллюстрации, разделенных точкой, например, Рисунок 1.1. Подпись к рисунку размещается под ним.

Таблицы выполняются с помощью функции «Вставка таблицы» в редакторе Word. Название таблицы размещается перед таблицей.

Реферативная работа должна иметь следующую структуру:

- титульный лист;
- оглавление;
- введение;
- основная часть;
- заключение;
- список использованных источников.

Во введении указывается актуальность рассматриваемой темы, цель работы, обозначаются основные задачи (вопросы), которые будут рассмотрены в работе.

В основной части каждый теоретический вопрос должен начинаться с новой страницы. Разделам присваиваются порядковые номера, обозначенные арабскими цифрами с точкой после цифры. При наличии подразделов, параграфов и пунктов ставятся двух- и трехкратные номера, разделенные точками. Переносы слов в заголовках не допускаются, точку в конце текста заголовка не ставят. Наименование разделов и подразделов должно быть кратким и соответствовать содержанию.

В заключении содержатся выводы по работе, отражающие достижение поставленной цели.

Список использованных источников должен включать все источники, используемые при ответе на вопрос. Ссылка в тексте на источник оформляется в квадратных скобках, например [1]. Дается библиографическое описание

каждого источника в соответствии с ГОСТ 7.1, ГОСТ 7.2. Рассмотрим примеры оформления библиографических описаний печатных изданий и электронных ресурсов.

*Печатные издания с одним автором*

1. Пучков В.А. Пожарная безопасность: учебник в 2-х частях. М.: АГПС МЧС России, 2017. 418 с.

*Печатные издания с двумя или тремя авторами*

1. Валуев Н.П. Инструментальные методы аналитической химии: учебное пособие / Н.П. Валуев, К.П. Латышенко, Л.Р. Шарифуллина. Химки: АГЗ МЧС. 2019. 186 с.

2. Ляшенко С.М. Информационно-методическое обеспечение надзорной деятельности МЧС России: учебное пособие / С.М. Ляшенко, Л.Р. Шарифуллина. Химки: ФГБВОУ ВО «Академия гражданской защиты МЧС России», 2019. 187с.

*Печатные издания с четырьмя и более авторами или без авторов*

1. Информатика. Базовый курс: учебник для вузов / Под. ред. С.В. Симоновича. СПб.: Питер, 2005. 640 с.

2. Научное обеспечение инновационного развития профессионального образования в области химической безопасности: монография / В.Н. Готов [и др.]. Чебоксары: Негосударственное образовательное частное учреждение дополнительного профессионального образования «Экспертно-методический центр», 2013. 70 с.

*Печатные издания – статьи*

1. Манаева А.Р. Обучение знакам пожарной безопасности в среде Moodle // Безопасность труда в промышленности. 2019. № 3. С.65-69.

2. Аносова Е.Б. и др. Современные синтетические материалы как источник чрезвычайных ситуаций // Научные и образовательные проблемы гражданской защиты. 2015. № 4(27). С. 91-94.

*Печатные издания – патенты и ГОСТы*

1. СП 156.13130.2014 «Станции автомобильные заправочные. Требования пожарной безопасности». М.: ФГБУ ВНИИПО МЧС России, 2014. 100с.

2. Российская Федерация. Законы. Технический регламент о требованиях пожарной безопасности [Текст]: Федер. Закон. М., «РГ» Федеральный выпуск 4720 [2008].

3. ГОСТ 19.105 – 78. Единая система программной документации. Общие требования к программным документам. М. Изд-во стандартов, 2001. 2 с.

#### *Печатные издания – диссертации*

1. Истратов, Р. Н. Нормирование требований пожарной безопасности к эвакуационным путям и выходам в стационарах социальных учреждений по обслуживанию граждан пожилого возраста: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.26.03. Москва. 2014. 24 с.

2. Манаева, А.Р. Пожарная опасность объектов социального назначения с использованием напольных покрытий – линолеумов: дис. ... канд. техн. наук: 05.26.03. Москва. 2018. 135 с.

#### *Для электронных ресурсов*

1. Исаков, Г.Н. Исследования процесса стеклования напольных покрытий на основе поливинилхлорида/ Г.Н. Исаков, А.Р. Манаева// Технологии техносферной безопасности.-2014.- № 6 (58).- 36 с. Режим доступа: <http://ipb.mos.ru/ttb> (дата обращения 12.12.2019).

2. Лопанов, А.Н. Моделирование процессов распространения пламени в адиабатических условиях/ А.Н. Лопанов, Е.А. Фанина // Технологии техносферной безопасности.-2013.- № 1 (47).- С.1-4. Режим доступа: <http://ipb.mos.ru/ttb> (дата обращения 12.12.2019).

## 1.2. Перечень тем реферативной части контрольной работы

Темы реферативной части контрольной работы выбираются по номеру фамилии студента в журнале учебной группы в соответствии с таблицей 1.

Таблица 1

Распределение тем реферативной части контрольной работы по номеру варианта

№ вар	Тема 1	Тема 2	№ вар	Тема 1	Тема 2	№ вар	Тема 1	Тема 2
<b>1</b>	1	31	<b>11</b>	11	41	<b>21</b>	21	51
<b>2</b>	2	32	<b>12</b>	12	42	<b>22</b>	22	52
<b>3</b>	3	33	<b>13</b>	13	43	<b>23</b>	23	53
<b>4</b>	4	34	<b>14</b>	14	44	<b>24</b>	24	54
<b>5</b>	5	35	<b>15</b>	15	45	<b>25</b>	25	55
<b>6</b>	6	36	<b>16</b>	16	46	<b>26</b>	26	56
<b>7</b>	7	37	<b>17</b>	17	47	<b>27</b>	27	57
<b>8</b>	8	38	<b>18</b>	18	48	<b>28</b>	28	58
<b>9</b>	9	39	<b>19</b>	19	49	<b>29</b>	29	59
<b>10</b>	10	40	<b>20</b>	20	50	<b>30</b>	30	60

### Темы реферативной части

#### Тема I.

1. Определение пожара. Процессы и явления, сопровождающие пожар.
2. Понятие процесса горения. Диффузионное и кинетическое горение.
3. Ламинарное и турбулентное пламя. Термохимические характеристики горения: температура горения, теплота сгорания, состав продуктов горения.
4. Механизм горения газовых смесей. Концентрационные пределы и скорость распространения пламени.
5. Минимальная энергия зажигания. Механизм горения аэрозвесей. Пределы воспламенения аэрозвесей (пылей).
6. Свойства, определяющие пожароопасность пылей (дисперсность, химическая активность, адсорбционная способность, склонность к электризации).

7. Механизм возникновения горения на поверхности жидкости. Температура вспышки.
8. Температурные пределы распространения пламени. Температура воспламенения. Скорость распространения пламени.
9. Расчетные и экспериментальные методы определения температуры вспышки и воспламенения горючих жидкостей.
10. Диффузионное горение жидкостей. Удельная массовая и линейная скорости выгорания жидкости.
11. Воспламенение твердых веществ и материалов. Особенности механизма зажигания и распространения пламени, линейная скорость распространения пламени.
12. Индекс распространения пламени по поверхности и методы его определения. Механизм выгорания твердых веществ.
13. Линейная и массовая скорости выгорания. Расчетные методы определения массовой скорости выгорания.
14. Особенности горения металлов и тушения пожаров класса D.
15. Горение пылей. Тление, механизм и способы предотвращения возникновения и развития процессов тления.
16. Особенности горения полимерных материалов.
17. Система показателей и оценка пожарной опасности веществ и материалов, область их применения. Параметры возникновения и распространения горения.
18. Показатели пожарной опасности газов, жидкостей, твердых веществ и пылей.
19. Основные явления и процессы при пожарах. Опасные факторы пожаров.
20. Основные стадии и динамика пожаров. Постоянная и переменная пожарная нагрузка.
21. Удельная пожарная нагрузка – характеристика пожарной опасности объектов.

22. Коэффициент поверхности горения. Классификация пожаров по пожарной нагрузке.

23. Пожары газовых фонтанов. Классификация пожаров газовых фонтанов. Параметры пожаров.

24. Дебит фонтана и методы его оценки, зона отрыва пламени.

25. Опасные факторы пожара. Расчет безопасных расстояний.

26. Пожары резервуаров. Физико-химические процессы при горении жидкостей в резервуарах, структура факела пламени.

27. Механизм выгорания жидкостей. Массовая и линейная скорости выгорания, их зависимости от вида, состава и условий горения горючих жидкостей.

28. Тепло- и массообмен между зоной горения и поверхностью жидкости. Прогрев жидкости по глубине. Поле температур.

29. Механизм образования гомотермического слоя. Явления вскипания и выброса жидкости при горении ее в резервуарах.

30. Открытые пожары твердых горючих материалов. Особенности горения твердых горючих материалов.

## **Тема 2.**

31. Физико-химические параметры горючей нагрузки – показатель степени пожарной опасности объекта.

32. Скорости распространения и выгорания на пожаре. Лесные и степные пожары.

33. Основные явления и процессы при внутренних пожарах. Опасные факторы и основные стадии внутренних пожаров.

34. Тепло- и газообмен на внутренних пожарах. Механизм и параметры газообмена при пожаре в помещении.

35. Фактическая и требуемая интенсивности газообмена, коэффициент избытка воздуха на внутреннем пожаре, плоскость равных давлений (нейтральная зона).

36. Экспериментальные и расчетные методы оценки параметров газообмена. Тепловой баланс внутреннего пожара.

37. Влияние аэродинамических условий на скорость и направление распространения фронта горения.

38. Пожары, регулируемые пожарной нагрузкой, и пожары, регулируемые вентиляцией. Высокотемпературный и низкотемпературный режимы пожаров.

39. Методы определения основных параметров пожара. Расчет площади внутреннего пожара.

40. Концентрационные пределы распространения пламени, их зависимость от различных факторов, расчетные методы определения и их практическое значение.

41. Тепловая теория прекращения горения, природа тепловыделения и теплотери при диффузионном горении, температура горения.

42. Способы прекращения горения на пожаре в зависимости от вида горючего материала и режима горения.

43. Температура потухания и пути и методы ее достижения: снижение интенсивности тепловыделения в зоне реакции за счет прекращения доступа горючего, разбавления смеси; повышение интенсивности теплоотвода из зоны реакции введением теплоемких компонентов, уменьшением объема зоны горения и увеличением площади теплообмена. Тушение химически активными ингибиторами.

44. Физико-механические способы тушения пламени, аэродинамический срыв на примере тушения газовых фонтанов, горючих жидкостей, тушение пламени изоляцией горючих компонентов от зоны горения.

45. Условия, необходимые для прекращения горения. Влияние режима горения и агрегатного состояния пожарной нагрузки на способы тушения пожара.

46. Понятие «огнетушащие вещества», их виды, свойства, область применения, эксплуатационные особенности.

47. Классификация огнетушащих веществ по механизму действия на процесс горения. Поверхностное и объемное тушение.

48. Вода как огнетушащее вещество. Механизм гасящего действия воды в зависимости от способа ее подачи, режима горения, пожарной нагрузки и ее вида. Теоретический и практический расход воды на тушение.

49. Пены как огнетушащие вещества. Основные свойства пен и способы получения. Пенообразователи, применяемые в пожарном деле. Область применения пены для целей пожаротушения. Критическая и оптимальная интенсивность подачи.

50. Негорючие газы (флегматизаторы), их основные физико-химические, токсические и коррозионные свойства.

51. Механизм гасящего действия негорючих газов, огнетушащие концентрации. Эксплуатационные особенности и области применения.

52. Галогеноуглеводороды (хладоны) и их применение в качестве ингибиторов горения. Основные физико-химические, токсические и эксплуатационные свойства. Механизм ингибирующего действия на процессы горения. Основные представители огнетушащих хладонов и область их применения.

53. Огнетушащие порошковые составы, механизм огнетушащего действия. Физико-химические и эксплуатационные свойства порошков, их особенности. Основные представители порошковых составов и область их применения для тушения пожаров.

54. Пути повышения эффективности огнетушащих веществ и составов. Комбинированные огнетушащие составы и механизм их действия.

55. Теоретическое обоснование основных параметров прекращения горения и принципы их оптимизации.

56. Основные параметры прекращения горения на пожарах: интенсивность подачи, удельный расход огнетушащего вещества, показатель эффективности тушения.



57. Расчет теоретических удельных расходов, интенсивности подачи и других параметров тушения газовых фонтанов, горючих жидкостей, твердых материалов водой и негорючими газами.

58. Коэффициент использования огнетушащих средств и методы его повышения.

59. Принципы разработки комбинированных способов тушения, их использование в практике пожаротушения.

60. Аэрозольные огнетушащие составы: практика применения.

### 1.3. Тестовые задания

Обучающемуся необходимо ответить письменно на тестовые задания в соответствии с номером варианта. Номер варианта соответствует номеру фамилии обучающегося в учебном журнале группы. Варианты заданий приведены в таблице 2.

Таблица 2

Варианты тестовых заданий

вариант	Уровень А (репродуктивный)					Уровень С (эвристический)	
	1	2	3	4	5	С-1	С-2
1	1	31	61	91	121	С-1	С-16
2	2	32	62	92	122	С-2	С-17
3	3	33	63	93	123	С-3	С-18
4	4	34	64	94	124	С-4	С-19
5	5	35	65	95	125	С-5	С-20
6	6	36	66	96	126	С-6	С-21
7	7	37	67	97	127	С-7	С-22
8	8	38	68	98	128	С-8	С-23
9	9	39	69	99	129	С-9	С-24
10	10	40	70	100	130	С-10	С-25
11	11	41	71	101	131	С-11	С-26
12	12	42	72	102	132	С-12	С-27
13	13	43	73	103	133	С-13	С-28
14	14	44	74	104	134	С-14	С-29
15	15	45	75	105	135	С-15	С-30
16	16	46	76	106	136	С-16	С-2
17	17	47	77	107	137	С-17	С-3
18	18	48	78	108	138	С-18	С-4
19	19	49	79	109	139	С-19	С-5
20	20	50	80	110	140	С-20	С-6
21	21	51	81	111	141	С-21	С-7
22	22	52	82	112	142	С-22	С-8
23	23	53	83	113	143	С-23	С-9
24	24	54	84	114	144	С-24	С-10
25	25	55	85	115	145	С-25	С-11
26	26	56	86	116	146	С-26	С-12
27	27	57	87	117	147	С-27	С-13
28	28	58	88	118	148	С-28	С-14
29	29	59	89	119	149	С-29	С-15
30	30	60	90	120	150	С-30	С-1

#### 1.3.1. Уровень А (репродуктивный)

1. Горение представляет собой:

А. окислительно-восстановительный процесс

Б.восстановительный процесс

В.взаимодействие вещества с кислородом

2.Условия возникновения горения:

А.горючее вещество, кислород

Б.источник воспламенения, кислород

В.горючее вещество, окислитель, источник воспламенения

3.Продукты полного сгорания органических веществ:

А.спирты, альдегиды

Б.органические кислоты, СО

В.СО<sub>2</sub>, Н<sub>2</sub>О

4.Продукты неполного сгорания органических веществ:

А.альдегиды, кетоны

Б.СО<sub>2</sub>, Н<sub>2</sub>О

В.СО<sub>2</sub>, Н<sub>2</sub>О

5.К горючим газам относятся:

А.водород

Б.азот

В.аргон

6.К горючим жидкостям относятся:

А.глицерин

Б.уксусная кислота

В.ацетон

7.К горючим твердым веществам относятся:

А.асбест

Б.цемент

В.уголь

8.Горючие вещества не способны к горению:

А.в воздухе

Б.в кислороде

В.в аргоне

9.К индивидуальным газам относятся:

А.этан

Б.природный газ

В.пиролизный газ

10.Условия, отвечающие 298 К и нормальному давлению, называются:

А.стандартными

Б.нормальными

В.обычными

11.Удельная теплота сгорания – это количество тепла, выделяющегося при сгорании единицы:

А.количества вещества

Б.масса вещества

В.объема вещества

12.Теплота сгорания горючих веществ определяется экспериментально с помощью:

А.термометра

Б.калориметра

В.барометра

13.Для расчетов теплоты сгорания веществ используются формулы:

А. Ломоносова М.В.

Б. Менделеева Д.И.

В. Бутлерова А.М.

14.Удельной теплотой пожара (удельной пожарной нагрузкой) называется количество тепла, выделяющегося в единицу времени:

А.с 1 м пожара

Б.с 1 м<sup>2</sup> пожара

В.с 1 м<sup>3</sup> пожара

15.Минимальное количество воздуха, необходимое для полного сгорания одной части вещества, называется количеством воздуха:

А.теоретическим

Б.практическим

В.расчетным

16.В уравнении теплового баланса горения ( $Q_n = q$ ) – левая часть уравнения – приход тепла, правая:

А.выделение тепла

Б.расход тепла

В.распределение тепла

17.Температурный режим пожара – изменение температуры пожара в горящем помещении:

А.в объеме

Б.в пространстве

В.во времени

18.Ламинарное диффузное пламя возникает при небольших потоках газов, которые двигаются:

А.с небольшой скоростью

Б.с высокой скоростью

В.с переменной скоростью

19.При большой скорости истечения газа пламя струи является:

А.ламинарным

Б.турбулентным

В.смешанным

20.Газы, у которых нельзя пренебречь силами взаимодействия между молекулами, называются:

А.идеальными

Б.инертными

В.реальными

21.К независимым параметрам газа относятся:

А.температура, давление, объем, масса

Б.температура, теплоемкость, давление, масса

В.температура, теплоемкость, объем, масса

22. Теплоемкость при постоянном давлении имеет обозначение:

А.  $C_p$

Б.  $C_{pt}$

В.  $C_{pv}$

23. Объем киломоля газа при нормальных условиях составляет:

А. 22,4 л

Б. 22,4 м<sup>3</sup>

В. 22,4 мл

24. Объемная теплоемкость при постоянном давлении имеет следующую размерность:

А. кДж / м<sup>3</sup>\*К

Б. кДж / л\*К

В. кДж/кг\*К

25. Теплосодержание продуктов сгорания при постоянном давлении представляет собой:

А. энтальпию тела

Б. массу тела

В. температуру тела

26. При неполном сгорании органических веществ частично образуются:

А. окислы металлов

Б. органические кислоты

В. сероводород

27. Объемная доля газа в смеси – это:

А. произведение объема компонента и объема всей смеси

Б. отношение объема компонента к объему всей смеси

В. отношение объема всей смеси к объему компонента

28. Молекулярная масса вещества выражается:

А. в атомных единицах массы

Б. в миллиграммах

В. в граммах

29. Массовая теплоемкость вещества - это количество тепла, необходимое для нагревания на 1 градус Кельвина:

А. 1 кг вещества

Б. 1 г вещества

В. 1 мг вещества

30. Основные компоненты сухого воздуха:

А. кислород и азот

Б. кислород и водород

В. кислород и озон

31. Газовая смесь состоит из газов:

А. химически несвязанных между собой

Б. вступающих в химическую реакцию

В. изолированных друг от друга

32. Плотность газа – это отношение:

А. объема газа к его массе

Б. массы газа к его молекулярной массе

В. массы газа к его объему

33. Единицы измерения киломолярной теплоемкости:

А. кДж /кмоль \*К

Б. ккал /кг\*К

В. ккал /г \*К

34. Объем мольгаза равен 22,4 л:

А. при любых условиях

Б. при нормальных условиях

В. при стандартных условиях

35. Процесс ускорения реакции окисления и переход её в горение называется:

А. тлением

Б. мерцанием

В. самовоспламенением

36. Условием возникновения теплового самовоспламенения является:

А.превышение скорости выделения тепла над скоростью теплоотвода

Б.равенство скорости выделения тепла и скорости теплоотвода

В.превышение скорости теплоотвода над скоростью выделения тепла

37.Чем выше средняя длина цепи углеводорода, тем температура его самовоспламенения:

А.ниже

Б.выше

В.не меняется

38.Самовозгорание – это процесс, у которого температура воспламенения:

А.выше обычной температуры

Б.равна обычной температуре

В.ниже обычной температуры

39.В легковоспламеняющихся жидкостях температура воспламенения выше температуры вспышки на:

А.1-5 °

Б.6-10 °

В.11-15 °

40.Жидкости, имеющие температуру вспышки от -18 ° С и ниже в закрытом тигле или -13 ° С и ниже в открытом:

А.особо опасные ЛВЖ

Б.постоянно опасные ЛВЖ

В.ЛВЖ, опасные при высокой температуре

41.Жидкости, имеющие температуру вспышки от +23 ° С до +61 ° С включительно в закрытом тигле или от +27 ° С до +66 ° С в открытом:

А.особо опасные ЛВЖ

Б.постоянно опасные ЛВЖ

В.ЛВЖ, опасные при высокой температуре

42.Жидкости, имеющие температуру вспышки от -18 ° С до +23 ° С в закрытом тигле или от -13 ° С до +27 ° С в открытом:

А.особо опасные ЛВЖ



Б. постоянно опасные ЛВЖ

В. ЛВЖ, опасные при высокой температуре

43. Если кратность пены равна  $K \leq 3$  то это пена:

А. низкократная пена

Б. пена средней кратности

В. пеноэмульсия

44. Если кратность пены равна  $3 < K \leq 20$  то это пена:

А. низкократная пена

Б. пена средней кратности

В. пена высокой кратности

45. Если кратность пены равна  $20 < K \leq 200$  то это пена:

А. низкократная пена

Б. пена средней кратности

В. пена высокой кратности

46. Если кратность пены равна  $K > 200$  то это пена:

А. низкократная пена

Б. пена средней кратности

В. пена высокой кратности

47. Пены, которые получают при взаимодействии растворов кислот и щелочей в присутствии пенообразующего вещества:

А. физико-химическая пена

Б. воздушно-механические пены

В. химические пены

48. Пены, которые получают, подавая различными способами воздух в водный раствор пенообразователя:

А. химические пены

Б. воздушно-механические пены

В. физико-химическая пена

49. Процесс, когда жидкость из пленок через систему каналов постепенно выделяется из пены:

А.коагуляция

Б.синерезис

В.опалесценция

50.Наиболее высокой термической устойчивостью обладают:

А.протеиновых пенообразователей

Б.синтетических углеводородных пенообразователей

В.фторсодержащих пенообразователей

51.Наиболее высокой пенообразующей способностью обладают пены на основе:

А.протеиновых пенообразователей

Б.синтетических углеводородных пенообразователей

В.фторсодержащих пенообразователей

52.При горении ЛВЖ и ГЖ предпочтительно применять для пожаротушения пены на основе:

А.протеиновых пенообразователей

Б.синтетических углеводородных пенообразователей

В.фторсодержащих пенообразователей

53.В механизме прекращения горения пенами на основе данного пенообразователя большую роль играет охлаждение:

А.протеинового пенообразователя

Б.синтетического углеводородного пенообразователя

В.фторсодержащего пенообразователя

54.В механизме прекращения горения большую роль играют высокие изолирующие способности у пен:

А.низкой кратности

Б.средней кратности

В.высокой кратности

55.Для тушения пожаров пеной в помещениях используют в основном пены на основе:

А.протеиновых пенообразователей

Б.синтетических углеводородных пенообразователей

В.фторсодержащих пенообразователей

56.Температура горения, до которой нагреваются продукты горения, когда все тепло, выделившееся при горении, идет на их нагрев:

А.действительная

Б.адиабатическая

В.теоретическая

57. Температура горения, в которой учитывается, что часть тепла теряется на излучение:

А.действительная

Б.адиабатическая

В.теоретическая

58.Температура горения на пожаре зависит от:

А.скорости, полноты горения, коэффициента избытка воздуха, массы

Б. скорости, полноты горения, коэффициента избытка воздуха, объема

В.скорости, полноты горения, коэффициента избытка воздуха, температуры воздуха

59.Масса пожарной нагрузки, выгоревшей в единицу времени с единицы площади пожара:

А.приведенная массовая скорость выгорания

Б.удельная массовая скорость выгорания

В.объемная массовая скорость выгорания

60.Масса выгоревшей пожарной нагрузки в единицу времени на единицу площади поверхности горения:

А.приведенная массовая скорость выгорания

Б.удельная массовая скорость выгорания

В.объемная массовая скорость выгорания

61.Количество энергии в виде теплоты, выделяющееся при пожаре в единицу времени:

А.низшая теплота сгорания

Б.тепловой эквивалент пожарной нагрузки

В.интенсивность пожара

62.Масса всех горючих и трудногорючих материалов, приходящихся на 1 м<sup>2</sup> площади их размещения (пола помещения или открытой площадки):

А.величина пожарной нагрузки

Б.тепловой эквивалент пожарной нагрузки

В.интенсивность пожара

63.Расстояние, которое проходит фронт пламени в единицу времени по поверхности горючего материала:

А.массовая скорость выгорания

Б.линейная скорость распространения пожара

В.объемная скорость выгорания

64.Количество огнетушащего вещества, подаваемого в единицу времени на единицу площади это:

А.скорость подачи

Б.интенсивность подачи

В.эффективность подачи

65.Интенсивность подачи, при которой количество подаваемой пены равно количеству разрушаемой:

А.критическая

Б.необходимая

В.оптимальная

66.Интенсивность подачи, при которой удельный расход раствора пенообразователя минимален:

А.критическая

Б.необходимая

В.оптимальная

67.Флегматизаторы:

А.увеличивают разность между ВКПР И НКПР

Б.уменьшают разность между ВКПР И НКПР

В.не оказывают влияния на разность между ВКПР И НКПР

68.Концентрация флегматизатора, при которой происходит слияние нижнего и верхнего концентрационных пределов называют:

А.минимальной флегматизирующей концентрацией

Б.оптимальной флегматизирующей концентрацией

В. верхней флегматизирующей концентрацией

69.К веществам, самовозгорающимся от воздействия на них воздуха, относятся:

А.белый фосфор

Б.хлорид натрия

В.серная кислота

70.К веществам, самовозгорающимся от действия на них воды, относятся:

А.алюминий

Б.калий

В.железо

71.Высокотемпературный источник, инициирующий горение, называется источником:

А.горения

Б.зажигания

В.самовоспламенения

72.Тепловой источник воспламенения – любое вещество, имеющее:

А.массу и запас тепла

Б.температуру и запас тепла

В.объем и запас энергии

73.Удельная массовая скорость горения вещества имеет размерность:

А.кг/(м<sup>2</sup> \*с)

Б.л/(м<sup>2</sup> \* с)

В.моль/(м<sup>2</sup>\*с)

74.При добавлении инертных добавок нормальная скорость распространения пламени:

А.увеличивается

Б.уменьшается

В.не меняется

75.Аббревиатура (сокращение), которое не относится к названию пределов распространения пламени:

А.НКПВ

Б.ВКПВ

В.ТДП

76.Отношение массового количества фактически затрачиваемого воздуха на сгорание пожарной нагрузки к теоретически необходимому количеству:

А.коэффициент избытка воздуха

Б.коэффициент недостатка воздуха

В.коэффициент горючей нагрузки

77.Для оценки пожарной опасности объектов производственного и складского назначения используют понятие:

А.энергетический эквивалент пожарной нагрузки

Б.тепловой эквивалент пожарной нагрузки

В.массовый эквивалент пожарной нагрузки

78.Плотность лучистого потока измеряется в:

А.кВт/м<sup>2</sup>

Б.кДж/кг

В. кВт/м<sup>3</sup>

79.Коэффициент полноты сгорания обозначают:

А. $\alpha$

Б.  $\beta$

В.  $\gamma$

80. Коэффициент избытка воздуха обозначают:

А. $\alpha$

Б.  $\beta$

В.  $\gamma$

81. Интенсивность лучистого потока от факела пламени, приходящаяся на единицу площади поверхности окружающих тел, называют:

А. плотностью лучистого потока

Б. массой лучистого потока

В. эффективностью лучистого потока

82. При уровне облученности менее... кВт/м<sup>2</sup> допустимо нахождение бойцов без специального теплозащитного снаряжения не более 15 минут при условии защиты кожных покровов (перчатки, защитные очки):

А. менее 1,6 кВт/м<sup>2</sup>

Б. менее 4,2 кВт/м<sup>2</sup>

В. менее 14 кВт/м<sup>2</sup>

83. Безопасное значение облученности, когда для работы личного состава не требуется специальных средств защиты в течение неопределенно долгого времени, составляет:

А. менее 1,6 кВт/м<sup>2</sup>

Б. менее 4,2 кВт/м<sup>2</sup>

В. менее 14 кВт/м<sup>2</sup>

84. Специальное теплозащитное снаряжение и защита с использованием распыленных водяных струй позволяют вести работу при облученности до... кВт/м<sup>2</sup>:

А. менее 1,6 кВт/м<sup>2</sup>

Б. менее 4,2 кВт/м<sup>2</sup>

В. менее 14 кВт/м<sup>2</sup>

85. Верхний концентрационный предел воспламенения газа – это концентрация газа в воздухе при воспламенении:

А. оптимальная

Б. минимальная

В. максимальная

86. Горение газовой смеси в ограниченном объеме приводит:

А. к уменьшению горения

Б.к увеличению горения

В.к взрыву

87.Теплота, выделяющаяся при сгорании веществ, имеет размерность:

А.кДж/м

Б.кДж/кмоль

В.кДж/с

88.Температура взрыва рассчитывается по уравнению:

А.баланса масс

Б.теплового баланса

В.баланса объемов

89.Самая низкая температура жидкости, при которой после зажигания и удаления источника воспламенения устанавливается стационарное горение, называется температурой:

А.взрыва

Б.горения

В.воспламенения

90.Состав газовой смеси задается:

А.давлением

Б.температурой

В.количественными долями

91.Теплоемкость при постоянном объеме имеет обозначение:

А. $C_v$

Б. $C_v T$

В. $C_v R$

92.Соотношение между температурой в кельвинах и в градусах Цельсия определяется по формуле:

А. $T \text{ K} = t^\circ\text{C} + 273\text{K}$

Б. $t^\circ\text{C} = T \text{ K} + 273\text{K}$

В. $T \text{ K} = t^\circ\text{C} - 273^\circ\text{C}$

93.Нормальное атмосферное давление принимается равным:



А.101 325 Па

Б.770 мм. рт. ст.

В.100 кПа

94.Единицы измерения киломолярной теплоемкости:

А.кДж/кмоль\*К

Б.ккал/кг\*К

В.ккал /г \*К

95.Горючие жидкости не имеют пределов воспламенения:

А.верхнего

Б.нижнего

В.среднего

96.Нижний температурный предел воспламенения жидкости называется температурой:

А.вспышки

Б.взрыва

В.горения

97.Легковоспламеняющиеся жидкости с температурой вспышки меньше 45°С:

А.глицерин

Б.скипидар

В.мазут

98.Температура вспышки с увеличением молекулярной массы жидкости:

А.уменьшается

Б.увеличивается

В.не меняется

99.Температура вспышки жидкости по сравнению с температурой воспламенения:

А.выше

Б.ниже

В.одна и та же

100. Чем меньше частицы пыли, тем степень её дисперсности:

А.выше

Б.ниже

В.не меняется

101.Минимальная концентрация в граммах на метр кубический, при которой пыль способна воспламеняться, называется:

А.нижний предел воспламенения

Б.верхний предел воспламенения

В.средний предел воспламенения

102.Примесь негорючих газов в пылевой смеси:

А.увеличивает её взрывоопасность

Б.снижает её взрывоопасность

В.не влияет на её взрывоопасность

103.Чем меньше затрачивается тепла для создания прогретого слоя твердого образца, тем пожароопасность образца:

А.больше

Б.меньше

В.не меняется

104.К легкоплавким, летучим металлам относятся:

А.серебро

Б.медь

В.натрий

105.В результате взаимодействия металла с кислородом воздуха в процессе горения металл покрывается слоем:

А.оксида

Б.сульфида

В.соли

106.Коэффициент поверхности при горении твердого вещества при горении равен ( $F_{п.г.}$  – поверхность горения,  $F_{п.}$  – площадь поверхности, на которой расположено горящее вещество):

А.  $F_{п.г.}/F_{п.г.}$

Б.  $F_{п.г.} * F_{п.}$

В.  $F_{п.г.} + F_{п.}$

107. Увеличение скорости горения достигается добавлением в зону горения:

А. негорючих веществ

Б. горючих веществ

В. воды

108. Уменьшение скорости горения достигается:

А. изоляцией реагирующих веществ

Б. добавлением горючих веществ

В. добавлением кислорода

109. Основное требование к средствам пожаротушения:

А. безвредность

Б. доступность

В. высокий эффект тушения

110. Легковоспламеняющимися жидкостями являются жидкости с температурой вспышки:

А. менее 28 °С

Б. менее 61 °С

В. более 61 °С

111. Богатая горючая смесь содержит в избытке:

А. катализатор

Б. горючее вещество

В. окислитель

Г. ингибитор горения

112. Окислителями в процессе горения могут быть:

А. углеводороды

Б. кислород, сера, галогены

В. щелочные металлы

Г.  $H_2SO_4$ ,  $HNO_3$ ,  $KMnO_4$

113. Минимальная температура горючего вещества, при которых над его поверхностью образуются пары или газы, способные возгораться от источника зажигания, но не способные к устойчивому горению, называется:

- А. температурой воспламенения
- Б. температурой вспышки
- В. температурой самовоспламенения;
- Г. температурой тления.

114. Хладоны, используемые для объемного огнетушения, представляют собой:

- А. коллоидные системы, состоящие из воды и ПАВ
- Б. смеси инертных газов
- В. предельные галогенуглеводороды
- Г. смеси мелкоизмельченных солей (карбонатов, галогенидов, фосфатов)

115. При контакте с воздухом возможно самовозгорание:

- А. щелочных металлов
- Б. карбамида
- В. растительных масел;
- Г. поливинилхлорида.

116. Взрывчатые вещества (ВВ) – это химические соединения, для которых характерно:

- А. термодинамическая устойчивость
- Б. быстрое экзотермическое превращение
- В. частичное или полное внутримолекулярное окисление – восстановление
- Г. низкое содержание кислорода

117. Вещества, способные к возгоранию в воздухе от источника зажигания, но не способные к горению после его удаления, называются:

- А. горючими
- Б. трудногорючими
- В. негорючими
- Г. легковоспламеняющимися

118. Нижний и верхней концентрационные пределы воспламенения – это показатели, характеризующие:

А. содержание горючего вещества в горючей смеси

Б. содержание окислителя в горючей смеси

В. состав горючего вещества

Г. состав окислителя

119. Взрыв за счет химической энергии характерен для:

А. горючих веществ

Б. легковоспламеняющихся веществ

В. взрывчатых веществ (ВВ)

Г. трудногорючих веществ

120. Время с момента возникновения горения до начала подачи огнетушащего вещества в очаг пожара называется:

А. длительностью горения

Б. временем свободного развития пожара

В. временем тушения

121. Площадь проекции зоны горения на горизонтальную плоскость:

А. коэффициент поверхности горения

Б. площадь поверхности горения

В. площадь пожара

122. Величина, характеризующая реальную площадь горючего, которая участвует в горении:

А. коэффициент поверхности горения

Б. площадь поверхности горения

В. площадь пожара

123. Отношение площади поверхности горения к площади пожара:

А. коэффициент поверхности горения

Б. площадь поверхности горения

В. площадь пожара

124.Путь, который на данном объекте проходит фронт пламени в единицу времени:

А.линейная скорость распространения пожара

Б. абсолютная массовая скорость выгорания

В.удельная массовая скорость выгорания

125.Масса горючего вещества, сгорающая в единицу времени:

А.линейная скорость распространения пожара

Б.абсолютная массовая скорость выгорания

В.удельная массовая скорость выгорания

126.Масса горючего вещества или материала, выгорающая в единицу времени с единицы площади пожара

А.линейная скорость распространения пожара

Б.абсолютная массовая скорость выгорания

В.удельная массовая скорость выгорания

127.Единицей измерения дебита газового фонтана является:

А.тыс\*м<sup>3</sup>/сутки

Б.млн\*м<sup>3</sup>/сутки

В.млрд\*м<sup>3</sup>/сутки

128.Интенсивность излучения измеряется в:

А.кВт/м<sup>2</sup>

Б. кВт/м<sup>3</sup>

В. кВт/м

129.Концентрация флегматизатора, при которой происходит слияние ВКПР и НКПР называют:

А.минимальной

Б.оптимальной

В.критической

130.Тепловой эквивалент пожарной нагрузки измеряется в:

А.кг/м<sup>2</sup>

Б.МДж/м<sup>2</sup>

В.кг/м<sup>3</sup>

131. Величина пожарной нагрузки измеряется в:

А.кг/м<sup>2</sup>

Б.МДж/м<sup>2</sup>

В.кг/м<sup>3</sup>

132. Доминирующее огнетушащее воздействие для воды:

А. ингибирующее

Б. изолирующее

В. охлаждающее

133. Доминирующее огнетушащее воздействие для хладонов и порошков:

А. охлаждающее

Б. изолирующее

В. ингибирующее

135. Доминирующее огнетушащее воздействие для пены:

А. охлаждающее

Б. изолирующее

В. ингибирующее

136. Горение твердых веществ, сопровождающееся тлением, относится к классу пожаров:

А.А1

Б.А2

В.В2

137. Горение жидких веществ, нерастворимых в воде (бензин, нефтепродукты), относится к классу пожаров:

А.А1

Б.А2

В.В2

138. Горение твердых веществ без тления (пластмассы, каучук), относится к классу пожаров:

А.А1

Б.А2

В.В2

139. Недостатками хладонов как средств пожаротушения является:

А.экологическая безопасность

Б. возможность применения при низких температурах

В. высокая токсичность

140. При горении металлов и металлосодержащих веществ, рекомендуемым средством тушения, является:

А. вода

Б. пена

В. порошки

141. Дебит слабого газонефтяного фонтана по мощности не превышает:

А. 2 млн м<sup>3</sup>/сут

Б. 5 млн м<sup>3</sup>/сут

В. 10 млн м<sup>3</sup>/сут

142. Для полного охвата помещения пламенем необходимо достижение среднеобъемной температуры не менее ...°С:

А. 100

Б. 200

В. 300

143. К стойким относятся пены, не разрушающиеся в течение не менее:

А. 3 минут

Б. 7 минут

В. 10 минут

144. Достоинствами хладонов как средств пожаротушения является:

А. экологическая безопасность

Б. возможность применения при низких температурах

В. низкая токсичность

145. При горении металлов и металлосодержащих веществ, рекомендуемым средством тушения, является:



А. вода

Б. пена

В. порошки

146. При хранении порошков необходимо избегать повышенной:

А. влажности

Б. температуры

В. давления

147. Почему нельзя тушить карбиды алюминия, цинка, магния водой:

А. реагируют со взрывом

Б. реагируют с выделением горючих газов

В. реакция сопровождается сильным экзотермическим эффектом

148. Почему нельзя тушить возгорание серной кислоты водой:

А. реагирует со взрывом

Б. реагирует с выделением горючих газов

В. реакция сопровождается сильным экзотермическим эффектом

149. Почему нельзя тушить возгорание щелочных металлов водой:

А. реагируют со взрывом

Б. реагируют с выделением горючих газов

В. реакция сопровождается сильным экзотермическим эффектом

150. Достоинством углекислого газа как средства пожаротушения является:

А. высокая эффективность

Б. низкая стоимость

В. удобство хранения

### 1.3.2. Уровень В (продуктивный)

Задания для самоконтроля. Дайте ответы на все тестовые задания уровня

В. Проверьте свои ответы по приведенным ниже ключам.

***Вставьте пропущенное слово или словосочетание [1]***

1. [1] – время от начала подачи огнетушащего вещества до момента прекращения горения называется

2. [1] – часть пространства, в которой протекают процессы термической подготовки горючих веществ и само горение; включает объем, ограниченный фронтом пламени и поверхностью горящего веществ.

3. [1] – прилегающая к зоне горения часть пространства, в границах которой протекают процессы теплообмена между поверхностью зоны горения и окружающими конструкциями и веществами.

4. [1] – количество воздуха, который притекает в единицу времени к единице площади пожара, называется.

5. [1] – отношение фактического секундного массового расхода воздуха, поступающего в зону горения, к теоретически необходимому секундному массовому расходу воздуха для осуществления процесса горения, называется

6. [1] – расстояние, которое проходит фронт пожара за единицу времени (м/с).

7. [1] – площадь проекции зоны горения на горизонтальную или вертикальную плоскость (м<sup>2</sup>).

***Напишите аббревиатуру [1], раскрывающую термин***

8. [1] – пожары, которые протекают при ограниченном содержании кислорода в газовой среде помещения и избытке горючих веществ и материалов.

9. [1] – пожары, протекающие при избытке воздуха для горения. Развитие такого пожара зависит от количества пожарной нагрузки.

10. [1] – отношение площади поверхности горения к площади пожара.

***Напишите единицу измерения [1] теплофизического параметра***

11. Удельная горючая нагрузка измеряется в [1].

12. Удельная пожарная нагрузка измеряется в [1].

13. Теплота пожара измеряется в [1].

14. Линейная скорость распространения пожара измеряется в [1].

15. Интенсивность подачи  $J$  огнетушащего вещества измеряется в [1].

16. Массовая скорость выгорания измеряется в [1].

17. Удельный расход газа измеряется в [1].
18. Единица измерения лучистого теплового потока [1].
19. Удельный охлаждающий эффект от единицы огнетушащего вещества [1].
20. Единица измерения удельной теплоемкости выделяющихся газов [1].

**Уровень В (продуктивный): ответы**

*Вставьте пропущенное слово или словосочетание [1]*

1. время тушения
2. зона горения
3. зона теплового влияния
4. интенсивность газообмена
5. коэффициент избытка воздуха
6. линейная скорость распространения пожара
7. площадь пожара.

*Напишите аббревиатуру [1], раскрывающую термин*

8. ПРН
9. ПРВ
10. КПП

*Напишите единицу измерения [1] теплофизического параметра*

1.  $\text{кг/м}^2$ .
2.  $\text{кДж/м}^2$ .
3. кВт.
4. м/с.
5.  $\text{л}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ .
6.  $\text{кг/с}$ .
7.  $\text{кг/м}^3$ .
8.  $\text{кВт/м}^2$ .
9.  $\text{кДж/кг}$ .
10.  $\text{кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ .

### 1.3.3. Уровень С (эвристический)

Этот блок заданий содержит вопросы, требующие развернутый ответ по темам дисциплины. Своими словами сформулируйте ответ на заданный вопрос. Объем ответа на один вопрос – 1-3 предложения.

#### Тема № 1. «Общая характеристика процесса горения»

##### Задание № С-1

Ответить на вопросы:

- а) Что такое горение?
- б) Чем отличается кинетическое горение от диффузионного?
- в) Что такое стехиометрическая горючая смесь?
- г) Какие вещества относятся к трудногорючим?

##### Задание № С-2

Ответить на вопросы:

- а) Какие окислители могут участвовать в процессе горения?
- б) В каких случаях ламинарное горение переходит в турбулентное?
- в) Что такое богатая горючая смесь?
- г) Какие вещества относятся к негорючим?

##### Задание № С-3

Ответить на вопросы:

- а) Почему процесс горения является самоподдерживающимся?
- б) Что такое беспламенное горение?
- в) Что такое бедная горючая смесь?
- г) Чем отличается дефлаграционное горение от детонационного?

#### Тема № 2. «Горение газов и аэрозвесей»

##### Задание № С-4

Ответить на вопросы:

- а) Каковы важнейшие характеристики пожаро- взрывоопасности газов?
- б) Каковы важнейшие показатели пожарной опасности аэрозвесей?
- в) Какие газы являются наиболее пожароопасными и почему?

г) Каков механизм горения газов?

#### Вариант № С-5

Ответить на вопросы:

а) Какие аэрозоли наиболее взрывоопасны?

б) Какие газы относятся к горючим? При какой температуре они образуют воспламеняемые смеси с воздухом?

в) Как определяют минимальную энергию зажигания газов?

г) Чем отличаются аэрозоли от аэрогелей?

#### Задание № С-6

Ответить на вопросы:

а) Почему горение газов часто носит взрывной характер?

б) Что такое НКПР и ВКПР?

в) Каковы источники образования аэровзвесей?

г) Чем отличается горение аэрозолей от горения аэрогелей?

### **Тема № 3. «Горение жидкостей»**

#### Задание № С-7

Ответить на вопросы:

а) Каковы важнейшие характеристики пожаро- взрывоопасности жидкостей?

б) Что такое НТПВ и ВТПВ?

в) Какие жидкости являются наиболее пожароопасными и почему?

г) Каков механизм горения жидкостей?

#### Задание № С-8

Ответить на вопросы:

а) Какие жидкости называют горючими? На какие группы по составу можно условно разделить горючие жидкости?

б) Какие характеристики жидкостей влияют на процесс их горения?

в) Каковы показатели пожарной опасности жидкостей?

г) На какие классы пожарной опасности делят горючие жидкости?

### Задание № С-9

Ответить на вопросы:

- а) Почему при температуре вспышки горение жидкостей носит неустойчивый характер?
- б) При каких условиях становится возможным устойчивое горение жидкостей?
- в) Какие жидкости наиболее пожароопасны?
- г) Как рассчитывают температуру горения жидкостей?

### Тема № 4. «Горение твёрдых веществ и материалов»

#### Задание № С-10

Ответить на вопросы:

- а) Каковы важнейшие характеристики пожаро- взрывоопасности твёрдых веществ?
- б) Каковы особенности горения целлюлозных материалов?
- в) Какие твёрдые вещества являются наиболее пожароопасными и почему?
- г) Каков механизм горения металлов?

#### Задание № С-11

Ответить на вопросы:

- а) Какие полимеры наиболее пожароопасны?
- б) Какие металлы относятся к летучим?
- в) Какие продукты образуются при пиролизе древесины?
- г) Каков механизм горения углистых остатков?

#### Задание № С-12

Ответить на вопросы:

- а) Каков механизм горения нелетучих металлов?
- б) Что такое массовая скорость выгорания твердого вещества?
- в) Для каких твёрдых веществ характерно беспламенное горение?
- г) Чем отличается горение термопластичных полимеров от

термореактивных?

### **Тема № 5. «Показатели пожарной опасности»**

#### **Задание № С-13**

Ответить на вопросы:

- а) Каковы важнейшие характеристики пожаро- взрывоопасности твёрдых веществ?
- б) Как определяют температуры воспламенения и самовоспламенения твёрдых веществ?
- в) Какие показатели используют для характеристики пожаровзрывоопасности жидкостей?
- г) Как определяют индекс распространения пламени?

#### **Задание № С-14**

Ответить на вопросы:

- а) Какие показатели используют для характеристики пожаровзрывоопасности газов?
- б) Какие показатели используют для характеристики пожаровзрывоопасности пылей?
- в) Как определяют коэффициент дымообразования?
- г) Как определяют концентрационные пределы воспламенения газов?

#### **Задание № С-15**

Ответить на вопросы:

- а) Для каких категорий горючих веществ определяют температуру самовоспламенения и каким образом?
- б) Как определяют показатели токсичности полимеров
- в) Какие показатели определяют класс пожарной опасности жидкостей?
- г) Для каких категорий горючих веществ определяют максимальное давление взрыва и каким образом это делают?

### **Тема № 6. «Параметры и классификация пожаров»**

### Задание № С-16

Ответить на вопросы:

- а) Каковы важнейшие параметры пожаров?
- б) Как определяют площадь поверхности горения?
- в) Какие виды классификации пожаров существуют?
- г) Как рассчитать тепловой эквивалент пожарной нагрузки?

### Задание № С-17

Ответить на вопросы:

- а) Какие параметры пожара определяют его динамику?
- б) Как рассчитать удельную массовую скорость выгорания пожарной нагрузки?
- в) Как определяют температуру пожара?
- г) Какие факторы влияют на интенсивность пожара?

## **Тема № 7. «Открытые пожары»**

### Задание № С-18

Ответить на вопросы:

- а) Каковы важнейшие отличия открытых пожаров от внутренних?
- б) Каковы особенности горения газовых фонтанов?
- в) Как образуется гомотермический слой при горении жидкостей в резервуарах?
- г) Каковы особенности степных пожаров?

### Задание № С-19

Ответить на вопросы:

- а) Какие стадии характерны для открытых пожаров?
- б) Каковы особенности газообмена открытого пожара?
- в) Каковы различия низовых и верховых лесных пожаров?
- г) Каковы причины возникновения огненных штормов?

## **Тема № 8. «Внутренние пожары»**



### Задание № С-20

Ответить на вопросы:

- а) Какие особенности газообмена характерны для внутреннего пожара?
- б) Как определяют температуру внутреннего пожара?
- в) Какие параметры внутренних пожаров являются наиболее важными?
- г) Как определяют площадь пожара?

### Задание № С-21

Ответить на вопросы:

- а) Каковы важнейшие стадии и фазы внутренних пожаров?
- б) Как определяют интенсивность пожара?
- в) Как рассчитать величину пожарной нагрузки?
- г) Каковы особенности теплообмена на внутреннем пожаре?

### Задание № С-22

Ответить на вопросы:

- а) В чем заключается тепловой механизм прекращения горения?
- б) Почему сложно прогнозировать скорость развития внутреннего пожара?
- в) Что такое объемная вспышка?
- г) Какой внутренний пожар более опасен – регулируемый пожарной нагрузкой или регулируемый вентиляцией?

## **Тема № 9. «Тепловая теория прекращения горения»**

### Задание № С-23

Ответить на вопросы:

- а) Каковы основные положения тепловой теории прекращения горения?
- б) Как определяют температуры прекращения горения графическим методом?
- в) Какие пути повышения интенсивности теплоотвода используют для прекращения горения?
- г) Как понижают интенсивность тепловыделения в очаге пожара?

#### Задание № С-24

Ответить на вопросы:

- а) Какие пути понижения интенсивности тепловыделения в очаге пожара используют при горении газов?
- б) Как увеличить интенсивность теплоотвода при горении твёрдых веществ?
- в) Как определяют температуры прекращения горения аналитическим методом?
- г) Какие способы достижения температуры прекращения горения жидкостей наиболее эффективны?

#### Задание № С-25

Ответить на вопросы:

- а) Можно ли уменьшить скорость горения за счет повышения энергии активации процесса? Аргументируйте свой ответ.
- б) Каковы причины прекращения горения фонтана?
- в) На чем основана классификация механизмов прекращения горения?
- г) Каким законом определяется зависимость скорости развития пожаров от времени?

### **Тема № 10. «Огнетушащие вещества и механизм огнетушащего действия»**

#### Задание № С-26

Ответить на вопросы:

- а) Каков механизм гасящего действия воды?
- б) Какова область применения пены для целей пожаротушения? Какие пенообразователи применяют в пожарном деле?
- в) Каковы физико-химические и эксплуатационные свойства огнетушащих порошков?
- г) Какие газы относятся к флегматизаторам? Каковы их основные физико-химические, токсические и коррозионные свойства?

### Задание № С-27

Ответить на вопросы:

- а) Каков доминирующий механизм огнетушащего действия хладонов?
- б) Из чего состоят комбинированные огнетушащие составы и каков механизм их действия?
- в) Как определяют коэффициент использования огнетушащего вещества?
- г) Какие вещества нельзя тушить водой и почему?

### Задание № С-28

Ответить на вопросы:

- а) Какие характеристики пен оказывают влияние на их огнетушащую способность?
- б) В каких случаях рекомендуется применять  $\text{CO}_2$  в качестве огнетушащего вещества?
- в) В чем заключается принцип тушения при применении аэрозольных составов?
- г) Что такое озоноразрушающий потенциал хладоновых составов?

## Тема № 11. «Параметры прекращения горения»

### Задание № С-29

Ответить на вопросы:

- а) Каковы важнейшие параметры прекращения горения на пожаре?
- б) Как рассчитать интенсивность подачи воды?
- в) Как определить оптимальную интенсивность подачи пены?
- г) Как определяют минимальную флегматизирующую концентрацию флегматизатора?

### Задание № С-30

Ответить на вопросы:

- а) Какие показатели используют для характеристики эффективности применяемых огнетушащих веществ?
- б) Как рассчитать количество теплоты, отводимой водой из очага пожара?

в) Что такое «критическая интенсивность» подачи огнетушащего вещества?

г) Как определяют коэффициент использования огнетушащего вещества?

## 2. РАСЧЕТНАЯ ЧАСТЬ КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЫ

Расчетная часть предусматривает решение задач по темам учебной программы дисциплины, связанных с определением основных параметров процесса прекращения горения. Текст каждой задачи, исходные данные следует переписывать полностью. Ход решения должен сопровождаться краткими пояснениями.

Приведены примеры расчета определения количества воздуха, объема и состава продуктов горения, концентрационных и температурных пределов воспламенения, теплоты и температуры горения.

В каждом разделе даны примеры решения задач, варианты для самостоятельного решения, справочные данные. Рассматриваются основные процессы, протекающие при пожарах, развивающихся внутри помещений и на открытых пространствах. Также рассматриваются сопутствующие им явления - вскипание и выброс жидкости при пожарах в резервуарах, общая и объемная вспышка в помещениях. Изучаются физико-химические основы прекращения горения, механизмы действия, области и особенности практического использования различных огнетушащих веществ.

## 2.1. Процессы горения различных веществ и материалов

### Тема № 1. Общая характеристика процесса горения. Расчёт теплового эффекта процесса горения

#### *Теоретическая часть*

Максимально возможную температуру процесса горения веществ и материалов можно рассчитать, если известно количество теплоты, выделяемое при сгорании горючего вещества, состав и объем продуктов горения, их теплоемкость или теплосодержание.

Тепловой эффект химической реакции горения (т.е. количество теплоты, выделяемое в ходе экзотермической реакции) называется низшей теплотой сгорания вещества  $Q_H$ .

Если горючее имеет в своем составе водород, то при его сгорании образуется вода в газообразном состоянии, которая охлаждаясь, будет конденсироваться. Так как в процессе конденсации паров тепло выделяется, то общее количество теплоты, полученное при сгорании вещества, будет больше на величину теплоты испарения  $Q_{исп}$ :

$$Q_B = Q_H + Q_{исп}, \quad (1)$$

где  $Q_B$  - высшая теплота сгорания вещества.

При расчетах температуры процесса горения пользуются величиной  $Q_H$ , так как при температуре горения вода находится в газообразном состоянии. Значения низшей теплоты сгорания вещества (тепловой эффект химической реакции) приводятся в справочной литературе. Для некоторых горючих веществ ее значение приведено в таблицах IV, VI и VII приложения (см. показатели пожарной опасности газов, жидкостей и твердых веществ). Эта величина может быть рассчитана по закону Гесса:

$$Q_H = -\left( \sum \Delta_f H_{298i}^0 \nu_i \right)_{\text{прод}} - \left( \sum \Delta_f H_{298i}^0 \nu_i \right)_{\text{исх}}, \quad (2)$$

который говорит о том, что тепловой эффект химической реакции равен разности сумм энтальпий образования продуктов реакции и исходных веществ,

взятой с обратным знаком. В уравнении (2)  $\Delta_f H^0_{298i}$  – энтальпия образования  $i$ -того вещества,  $\nu_i$  – количество моль  $i$ -того вещества.

Напомним из курса химии, что **энтальпия образования** сложного вещества равна количеству теплоты, выделившейся при его образовании из простых веществ, взятой с обратным знаком. Энтальпия образования простого вещества (вещества, молекулы которого состоят из атомов одного элемента, например, ( $N_2$ ,  $O_2$ ,  $H_2$ ,  $S$ ,  $C...$ )) принимается равной нулю. Значения энтальпии образования некоторых горючих веществ приводятся в таблице 3.

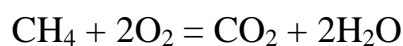
Таблица 3

Термодинамические свойства некоторых веществ ( $T = 298-1000$  К)

Вещество	$\Delta_f H^0_{298}$ , кДж/моль	$S^0_{f,298}$ , Дж/(моль·К)	$\Delta_f G^0_{298}$ , кДж/моль
$O_2$ (г) кислород	0,00	205,04	0
$CO_2$ (г) углекислый газ	-393,51	213,66	- 394,37
$H_2O$ (г) вода	-241,81	188,72	- 228,61
$CH_4$ (г) метан	-74,85	186,27	- 50,85
$CH_2O$ (г) формальдегид	-115,90	218,78	- 109,94
$CH_2O_2$ (г) муравьиная кислота	-424,76	128,95	- 361,74
$CH_4O$ (г) метанол	-201,00	239,76	- 162,38
$CCl_4$ (г) тетрахлорметан	-100,42	310,12	- 58,23
$CHCl_3$ (г) трихлорметан	-101,25	295,64	- 68,52
$CH_2Cl_2$ (г) дихлорметан	-95,39	270,24	- 68,87
$CH_3Cl$ (г) хлорметан	-86,31	234,47	- 62,90
$CH_5N$ (г) метиламин	-23,01	242,59	32,18
$C_2H_6$ (г) этан	-84,67	229,49	- 32,93
$C_2H_4$ (г) этилен	52,30	219,45	68,14
$C_2H_2$ (г) ацетилен	226,75	200,82	209,20
$C_2H_4O_2$ (г) уксусная кислота	- 434,84	282,50	- 376,68

C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> O (г) этанол	- 276,98	160,67	- 174,15
C <sub>2</sub> H <sub>7</sub> N (г) диметиламин	- 18,83	272,96	67,91
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> O (г) диметиловый эфир	- 184,05	267,06	- 112,94
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> (г) пропан	- 103,85	269,91	- 23,53
C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> (г) циклопропан	53,30	237,44	104,38
C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> O (г) бутанол	- 274,43	363,17	- 15073,00
C <sub>5</sub> H <sub>12</sub> (г) пентан	- 146,44	348,95	- 8,44
C <sub>5</sub> H <sub>10</sub> (г) циклопентан	- 77,24	292,88	38,57
C <sub>6</sub> H <sub>14</sub> (г) гексан	- 167,19	388,40	- 0,32
C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> (г) циклогексан	- 123,14	298,24	31,70
C <sub>6</sub> H <sub>6</sub> (г) бензол	82,93	269,20	129,68
C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> Cl (г) хлорбензол	51,84	313,46	99,15
C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> N (г) пиридин	140,16	282,80	190,23
C <sub>6</sub> H <sub>7</sub> N (г) анилин	86,86	319,20	166,67
C <sub>7</sub> H <sub>8</sub> (г) толуол	50,00	320,66	122,03
о-C <sub>8</sub> H <sub>10</sub> (г) о-ксилол	19,00	352,75	122,09
H <sub>2</sub> S (г) сероводород	- 20,6	205,70	- 33,50
CS <sub>2</sub> (г) сероуглерод	115,30	237,80	66,55

При сгорании метана:



низшая теплота сгорания, согласно закону Гесса, равна:

$$Q_{\text{н}} = -\left( \Delta_f H_{298\text{CO}_2}^0 \nu_{\text{CO}_2} + \Delta_f H_{298\text{H}_2\text{O}}^0 \nu_{\text{H}_2\text{O}} - \Delta_f H_{298\text{CH}_4}^0 \nu_{\text{CH}_4} - \Delta_f H_{298\text{O}_2}^0 \nu_{\text{O}_2} \right) \quad (3)$$

Азот в реакции участие не принимает, поэтому при расчете  $Q_{\text{н}}$  в уравнении его можно не писать.

Учитывая, что кислород - простое вещество и для него  $\Delta_f H_{298\text{O}_2}^0 = 0$ ,

$$Q_{\text{н}} = -\left( \Delta_f H_{298\text{CO}_2}^0 \nu_{\text{CO}_2} + \Delta_f H_{298\text{H}_2\text{O}}^0 \nu_{\text{H}_2\text{O}} - \Delta_f H_{298\text{CH}_4}^0 \nu_{\text{CH}_4} \right)$$



Подставляя значения энтальпии образования  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  и  $\text{CH}_4$  из таблицы 1, получим:

$$Q_{\text{H}} = -((-393,35) \cdot 1 + (-241,81) \cdot 2 - (-74,85)) = 802,62 \text{ кДж/моль.}$$

При сгорании смеси индивидуальных веществ сначала определяют теплоту сгорания каждого компонента, а затем их суммируют с учетом процентного содержания каждого горючего вещества в смеси:

$$Q_{\text{H}}^{\text{см}} = \sum Q_{\text{H}i} \frac{\Phi_{\text{Г}i}}{100}. \quad (4)$$

Для расчета температуры горения составим уравнение теплового баланса, считая, что выделившееся в результате сгорания тепло нагревает продукты горения ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{N}_2$ ...) от начальной температуры  $T_0$  до температуры  $T_{\text{Г}}$ :

$$Q_{\text{H}}(1 - \eta) = \sum c_{p_{\text{П}i}} V_{\text{П}i} (T_{\text{Г}} - T_0), \quad (5)$$

где  $\eta$  – коэффициент теплопотерь (доля потерь тепла на излучение, а также в результате неполноты сгорания);  $c_{p_{\text{П}i}}$  и  $V_{\text{П}i}$  – теплоемкость и объем  $i$ -го продукта горения.

В уравнении теплового баланса записана теплоемкость газа при постоянном давлении ( $c_p$ ), так как именно в этих условиях чаще всего происходит горение.

Из уравнения теплового баланса следует:

$$T_{\text{Г}} = T_0 + \frac{Q_{\text{H}}(1 - \eta)}{\sum c_{p_{\text{П}i}} V_{\text{П}i}}. \quad (6)$$

Трудность в определении  $T_{\text{Г}}$  по этой формуле заключается в том, что теплоемкость газа зависит от температуры. Так как газы нагреваются от температуры  $T_0$  до  $T_{\text{Г}}$ , то в формулу (6) необходимо подставить среднее значение теплоемкости именно в этом интервале температур. Среднее значение температуры горения большинства веществ в воздухе составляет примерно 1500 К. Поэтому с небольшой погрешностью в определении  $T_{\text{Г}}$  для расчетов можно взять среднее значение теплоемкости в интервале температур 273-

1500 К. Среднее значение теплоемкости для основных продуктов горения приведены в таблице 4.

Таблица 4

Средняя удельная теплоёмкость газов

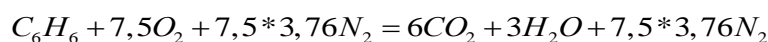
Вещество	Удельная теплоемкость, $c_{p_i}$	
	кДж/(м <sup>3</sup> ·К)	кДж/(моль·К)
Диоксид углерода	2,27	$5,08 \cdot 10^{-2}$
Диоксид серы	2,28	$5,11 \cdot 10^{-2}$
Вода (пар)	1,78	$3,99 \cdot 10^{-2}$
Азот	1,42	$3,18 \cdot 10^{-2}$
Воздух	1,44	$3,23 \cdot 10^{-2}$

*Примеры решения типовых задач*

**Пример 1.** Рассчитать по закону Гесса низшую теплоту горения вещества в кДж/моль и кДж/м<sup>3</sup>.

**Решение:**

1. Запишем уравнение реакции горения бензола в воздухе:



2. Уравнение закона Гесса для этого случая будет выглядеть так:

$$Q_H = -(6\Delta H_{CO_2} + 3\Delta H_{H_2O} - \Delta H_{C_6H_6})$$

$$Q_H = (6 \cdot 396,9 + 2 \cdot 342,2 + 34,8) \text{ кДж / кмоль} = 3142,8 \cdot 10^3 \text{ кДж / кмоль}$$

3. Низшую теплоту сгорания 1 кг бензола найдем исходя из закона Авогадро и определения киломоля. При сгорании 1 кмоль = 78 кг выделяется тепло  $Q_H = 3142,8 \cdot 10^3$  кДж; при сгорании 1 кг выделяется тепло:

$$Q_H = 3142,8 \cdot 10^3 \text{ кДж / кмоль} / (78 \text{ кг / кмоль}) = 40292,3 \text{ кДж / кг}$$

4. Теплоту сгорания 1 м<sup>3</sup> паров бензола при нормальных условиях определим, используя следствие из закона Авогадро:

$$Q_H = 3142,8 \cdot 10^3 \text{ кДж / кмоль} / 24 = 140303,6 \text{ кДж / м}^3$$

**Пример 2.** Определить низшую теплоту сгорания в кДж/м<sup>3</sup> и кДж/кмоль газовой смеси, имеющей следующий состав: CO= 20 %, H<sub>2</sub> =10 %, CH<sub>4</sub> = 20 %, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> = 20 %, CO<sub>2</sub> = 10 %, N<sub>2</sub> = 10 %, O<sub>2</sub> = 10 %. Начальные условия — нормальные.

**Решение:**

1. Из справочника определяем теплоту сгорания компонентов:

$$Q_{HCO} = 12650 \text{ кДж} / \text{ м}^3;$$

$$Q_{HH_2} = 10770 \text{ кДж} / \text{ м}^3;$$

$$Q_{HCH_4} = 35820 \text{ кДж} / \text{ м}^3;$$

$$Q_{HC_2H_6} = 63690 \text{ кДж} / \text{ м}^3;$$

2. Находим теплоту сгорания 1 м<sup>3</sup> смеси:

$$Q_H = 12650 \frac{20}{100} + 10770 \frac{10}{100} + 35820 \frac{20}{100} + 63690 \frac{20}{100} = 23509 \text{ кДж} / \text{ м}^3$$

3. Теплоту сгорания 1 кмоль газовой смеси найдем, используя следствие из закона Авогадро: 1 кмоль любого газа при нормальных условиях занимает объем 22,4 м<sup>3</sup>. Тогда:

$$Q_H = 23509 \text{ кДж} / \text{ м}^3 * 22,4 \text{ м}^3 / \text{ кмоль} = 526,6 * 10^3 \text{ кДж} / \text{ кмоль}.$$

*Задание для самостоятельного решения*

### **Задача № 1.**

Определить низшую теплоту сгорания в кДж/м<sup>3</sup> и кДж/кмоль газовой смеси, имеющей % состав в соответствии с данными таблицы 1. Начальные условия — нормальные. Номер варианта соответствует номеру фамилии студента в учебном журнале группы.

Таблица 5

Исходные данные для задачи №1

№ варианта	Состав вещества, %						
	CO	H <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	CO <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>
1	20	10	20	10	20	10	10
2	10	20	20	20	10	10	10
3	15	15	20	20	10	10	10

4	15	10	20	25	10	10	10
5	10	20	20	25	5	10	10
6	20	10	10	10	10	20	20
7	20	10	5	5	20	10	20
8	20	10	5	5	20	20	20
9	20	20	20	20	10	5	5
10	20	10	5	5	10	25	25
11	10	25	25	20	10	5	5
12	20	10	5	5	20	20	20
13	20	20	20	20	10	5	5
14	20	10	10	15	15	15	15
15	15	15	15	15	20	10	10
16	20	15	15	15	15	10	10
17	15	15	10	10	20	15	15
18	20	20	20	10	10	10	10
19	10	10	10	10	20	20	20
20	15	10	15	10	20	20	10
21	20	10	15	10	20	10	15
22	20	10	25	10	10	10	15
23	20	10	30	10	10	10	10
24	20	10	35	10	10	10	5
25	20	10	10	35	10	10	5
26	20	10	40	5	10	10	5
27	20	10	25	15	10	10	10
28	20	10	20	20	10	10	10
29	20	10	30	10	10	15	5
30	20	10	35	5	10	10	10

## Тема № 2. Горение газов и аэрозвесей. Расчёт объёмов воздуха и продуктов горения

### Теоретическая часть

В практической части данной темы разбираются задачи на расчёт объёмов воздуха и продуктов горения.

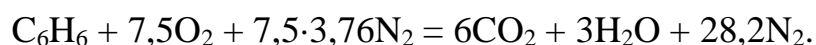
Минимальное количество воздуха, необходимое для полного сгорания единицы количества (кг, кмоль, м<sup>3</sup>) горючего вещества, называется *теоретическим количеством воздуха*  $V_B^0$ .

При горении на пожарах расход воздуха отличается от теоретически необходимого. Действительный расход воздуха на единицу горючего записывается как  $V_B = \alpha \cdot V_B^0$ . Множитель  $\alpha$  называется *коэффициентом избытка воздуха*. Разность между действительным и теоретически необходимым количеством воздуха называется *избытком воздуха*.

$$\Delta V = V_B - V_B^0 \quad \text{или} \quad \Delta V_B = V_B^0(\alpha - 1) \quad (7)$$

Определение количества воздуха и объема продуктов горения оказывается возможным на основании закона сохранения массы по уравнениям химических реакций.

При составлении уравнения материального баланса процессов горения принято учитывать не только кислород, принимающий участие в реакции окисления, но и азот, входящий в состав воздуха. Так как на один моль кислорода в воздухе приходится 3,76 моль азота (состав воздуха: 21 % O<sub>2</sub> и 79 % N<sub>2</sub>), то материальный баланс процесса горения, например, бензола в воздухе можно записать так:



Из этого уравнения видно, что для полного сгорания 1 моль бензола требуется (7,5+7,5·3,76) моль воздуха (7,5 кмоль O<sub>2</sub> и 7,5·3,76 моль, не принимающего участия в горении N<sub>2</sub>). При сгорании образуется 6 моль CO<sub>2</sub>, 3 моль H<sub>2</sub>O и остается непрореагировавшим (7,5·3,76) = 28,2 моль N<sub>2</sub>.

В общем виде можно записать:

$$V_B^0 = \frac{V_{O_2} + V_{N_2}}{V_r}, \quad (8)$$

где  $v_{O_2}$ ,  $v_{N_2}$ ,  $v_r$  - число моль кислорода, азота и горючего вещества в уравнении материального баланса, моль.

Аналогично объем продуктов горения:

$$V_{CO_2} = \frac{V_{CO_2}}{V_r}, V_{H_2O} = \frac{V_{H_2O}}{V_r} \text{ и } V_{N_2}^0 = \frac{V_{N_2}}{V_r},$$

где  $V_{N_2}^0$  - объем азота, рассчитанный из уравнения материального баланса, моль/моль.

Объем продуктов горения:

$$V_{\text{пр}}^0 = V_{CO_2} + V_{H_2O} + V_{N_2}^0. \quad (9)$$

Если горение происходит с избытком воздуха ( $\alpha > 1$ ), то азота в продуктах горения будет больше:

$$V_{N_2} = V_{N_2}^0 + 0,79\Delta V_B \quad (10)$$

и в продуктах горения появится кислород

$$V_{O_2} = 0,21\Delta V_B.$$

В этом случае полный объем продуктов горения

$$V_{\text{пр}} = V_{\text{пр}}^0 + \Delta V_B \quad (11)$$

В рассматриваемом случае:

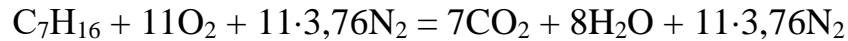
$$V_{\text{пр}} = V_{CO_2} + V_{H_2O} + V_{N_2} + V_{O_2}.$$

Для газообразных горючих веществ расчет объемов воздуха и продуктов горения чаще всего проводят в  $\text{м}^3/\text{м}^3$ . Так как 1 кмоль любого газа в одинаковых условиях занимает один и тот же объем (при нормальных условиях  $22,4 \text{ м}^3$ ), то объем, рассчитанный в  $\text{м}^3/\text{м}^3$ , численно будет таким же, как и в кмоль/кмоль.

Если горючее вещество находится в конденсированном состоянии (жидком или твердом), то, как правило, расчеты объемов воздуха и продуктов горения проводят в  $\text{м}^3/\text{кг}$ . Для этого кмоль воздух или продукта горения

переводят в м<sup>3</sup>, умножая на объем одного кмоль газа (22,4 м<sup>3</sup>/кмоль), а кмоль горючего переводят в кг, умножая на массу одного кмоль горючего ( $M_r$ , кг/кмоль).

Например, при сгорании 1 кг гептана



требуется воздуха:

$$V_B^0 = \frac{(v_{O_2} + v_{N_2})22,4}{v_r M_r} = \frac{(11 + 11 \cdot 3,76)22,4}{1 \cdot 100} = 11,7 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

образуется  $V_{CO_2} = \frac{v_{CO_2} \cdot 22,4}{v_r M_r} = \frac{7 \cdot 22,4}{1 \cdot 100} = 1,57 \text{ м}^3/\text{кг}.$

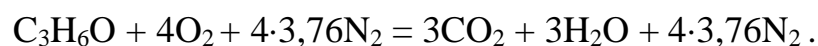
Аналогично можно рассчитать объемы и других продуктов горения данной реакции.

### *Примеры решения типовых задач*

**Пример 1.** Определить объемы воздуха и продуктов горения при нормальных условиях, если при пожаре на складе сгорело 1000 кг ацетона, а горение протекало при избытке воздуха,  $\alpha = 2$ .

**Решение:**

Сгорает индивидуальное химическое соединение. Запишем уравнение реакции горения ацетона в воздухе:



Объем воздуха, необходимого для сгорания 1 кг ацетона:

$$V_B^0 = \frac{(v_{O_2} + v_{N_2})22,4}{v_r M_r},$$

учитывая, что масса одного киломоля ацетона составляет 58 кг/кмоль, получим:

$$V_B^0 = \frac{(4 + 4 \cdot 3,76)22,4}{1 \cdot 58} = 7,4 \text{ м}^3 / \text{кг}.$$

Действительный объем воздуха с учетом коэффициента избытка воздуха  $\alpha=2$ .

$$\Delta V_B = \alpha \cdot V_B^0 = 2 \cdot 7,4 = 14,8 \text{ м}^3 / \text{кг},$$

а избыток воздуха:

$$\Delta V_B = V_B - V_0 = V_B^0 \cdot (\alpha - 1) = 7,4 \cdot (2 - 1) = 7,4 \text{ м}^3 / \text{кг}.$$

Объем продуктов горения

$$V_{\text{пр}}^0 = \frac{(v_{\text{CO}_2} + v_{\text{H}_2\text{O}} + v_{\text{N}_2}) \cdot 22,4}{v_{\text{Г}} M_{\text{Г}}} = \frac{(3 + 3 + 4 \cdot 3,76) \cdot 22,4}{1 \cdot 58} = 8,1 \text{ м}^3 / \text{кг}.$$

С учетом избытка воздуха полный объем продуктов горения

$$V_{\text{пр}} = V_{\text{пр}}^0 + \Delta V_B = 8,1 + 7,4 = 15,5 \text{ м}^3 / \text{кг}.$$

При сгорании 1000 кг ацетона объем воздуха при нормальных условиях составит:  $14,8 \text{ м}^3/\text{кг} \cdot 1000 \text{ кг} = 14\,800 \text{ м}^3$ , а объем продуктов горения:

$$15,5 \text{ м}^3/\text{кг} \cdot 1000 \text{ кг} = 15\,500 \text{ м}^3.$$

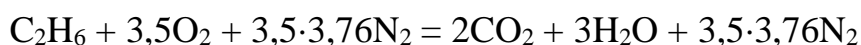
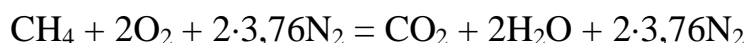
*Примечание.* Если в процессе горения была задана другая температура, то объем продуктов горения и воздуха рассчитывается с учетом объема, который занимает один кмоль газа при этой температуре:

$$V = \frac{22,4 P_0 T}{T_0 P}, \quad (12)$$

где  $P_0 = 101,3 \text{ кПа}$ ;  $T_0 = 273,15 \text{ К}$ ;  $T$  и  $P$  - заданные температура и давление.

При сгорании смеси индивидуальных химических веществ расчет необходимого количества воздуха и объема продуктов горения проводят по каждому из веществ, а затем суммируют с учетом его процентного содержания в смеси. При этом расчет объема воздуха можно упростить, если вести его сначала по кислороду, а затем пересчитать на воздух.

**Пример 2.** При сгорании  $1 \text{ м}^3$  смеси, состоящей из  $\text{CH}_4$  - 50 %,  $\text{C}_2\text{H}_6$  - 15 %,  $\text{CO}$  - 12 %,  $\text{H}_2$  - 10 %,  $\text{CO}_2$  - 5 %,  $\text{O}_2$  - 5 % (об.) участвуют в горении:





Присутствующий в исходной смеси  $\text{CO}_2$  добавится к продуктам горения, а  $\text{O}_2$  примет участие в горении как окислитель и тем самым уменьшит потребность в воздухе.

Рассчитаем количество  $\text{O}_2$ , необходимое для сгорания  $1 \text{ м}^3$  смеси. Из уравнения реакции следует, что для сгорания  $1 \text{ м}^3 \text{ CH}_4$  требуется  $2 \text{ м}^3 \text{ O}_2$ , но метана в смеси 50%, поэтому на его сгорание потребуется кислорода в два раза меньше  $2(50/100) \text{ м}^3$ . В общем виде это будет выглядеть так:

$$\frac{v_{\text{O}_2}}{v_{\text{CH}_4}} \frac{\varphi_{\text{CH}_4}}{100} \quad (13)$$

Если просуммировать кислород по всем горючим компонентам, то получим:

$$\frac{2 \cdot 50}{1 \cdot 100} + \frac{3,5 \cdot 15}{1 \cdot 100} + \frac{0,5 \cdot 12}{1 \cdot 100} + \frac{0,5 \cdot 10}{1 \cdot 100}$$

или в общем виде

$$\frac{v_{\text{O}_2}}{v_{\text{CH}_4}} \frac{\varphi_{\text{CH}_4}}{100} + \frac{v_{\text{O}_2}}{v_{\text{C}_2\text{H}_6}} \frac{\varphi_{\text{C}_2\text{H}_6}}{100} + \frac{v_{\text{O}_2}}{v_{\text{CO}}} \frac{\varphi_{\text{CO}}}{100} + v \frac{v_{\text{O}_2}}{v_{\text{H}_2}} \frac{\varphi_{\text{H}_2}}{100}.$$

Учитывая кислород, содержащийся в исходной смеси (он уменьшает потребность в воздухе), получим:

$$V_{\text{O}_2} = \frac{v_{\text{O}_2}}{v_{\text{CH}_4}} \frac{\varphi_{\text{CH}_4}}{100} + \frac{v_{\text{CO}_2}}{v_{\text{C}_2\text{H}_6}} \frac{\varphi_{\text{C}_6\text{H}_6}}{100} + \frac{v_{\text{O}_2}}{v_{\text{CO}}} \frac{\varphi_{\text{CO}}}{100} + \frac{v_{\text{O}_2}}{v_{\text{H}_2}} \frac{\varphi_{\text{H}_2}}{100} - \frac{\varphi_{\text{O}_2}}{100}.$$

В общем случае формула для расчета требуемого объема воздуха:

$$V_{\text{O}_2} = \frac{1}{100} \left( \sum \frac{v_{\text{O}_2i}}{v_{ri}} \varphi_{ri} - \varphi_{\text{O}_2} \right). \quad (14)$$

Учитывая, что в воздухе 21 % кислорода, можно записать:

$$V_{\text{B}}^0 = \frac{V_{\text{O}_2} \cdot 100}{21},$$

$$V_{\text{B}}^0 = \frac{\sum \frac{v_{\text{O}_2i}}{v_{ri}} \varphi_{ri} - \varphi_{\text{O}_2}}{21}. \quad (15)$$

Рассчитаем количество воздуха, необходимого для горения, воспользовавшись полученной формулой:

$$V_B^0 = \frac{\frac{2}{1}50 + \frac{3,5}{1}15 + \frac{0,5}{1}12 + \frac{0,5}{1}10 - 5}{21} = 7,5 \text{ м}^3 / \text{м}^3.$$

Объемы продуктов горения находят, суммируя каждый компонент, образующийся при сгорании различных веществ с учетом их процентного содержания в смеси. Например,  $\text{CO}_2$  образуется при сгорании  $\text{CH}_4$ ,  $\text{C}_2\text{H}_6$  и  $\text{CO}$ , и некоторое количество его содержалось в исходной смеси до горения.

$$V_{\text{CO}_2} = \frac{V_{\text{CO}_2}}{V_{\text{CH}_4}} \frac{\varphi_{\text{CH}_4}}{100} + \frac{V_{\text{CO}_2}}{V_{\text{C}_2\text{H}_6}} \frac{\varphi_{\text{C}_2\text{H}_6}}{100} + \frac{V_{\text{CO}_2}}{V_{\text{CO}}} \frac{\varphi_{\text{CO}}}{100} + \frac{\varphi_{\text{CO}_2}}{100},$$

подставляя численные значения, получим:

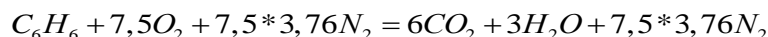
$$V_{\text{CO}_2} = \frac{1}{1} \frac{50}{100} + \frac{2}{1} \frac{15}{100} + \frac{1}{1} \frac{12}{100} + \frac{8}{100} = 1 \text{ м}^3 / \text{м}^3.$$

Аналогично находят и другие объемы продуктов горения ( $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{N}_2$ ).

**Пример 3.** Определить объем и состав продуктов горения бензола и его паров в кмоль/кмоль,  $\text{м}^3/\text{м}^3$ ,  $\text{м}^3/\text{кг}$ , если  $\alpha=1,5$ ,  $T_{\text{п.г.}}=1600 \text{ К}$ ,  $P=90\,000 \text{ Па}$ .

**Решение:**

1. Определим объем продукта горения. Запишем реакцию горения.



Для расчета воспользуемся данными:

$$m_{\text{CO}_2}=6; m_{\text{H}_2\text{O}}=3; \alpha=1; \beta k=7,5.$$

Найдем расчетный объем продуктов по формуле

$$V_{\text{п.г.}}^0 = \frac{6}{1}(\text{CO}_2) + \frac{3}{1}(\text{H}_2\text{O}) + \frac{3,76 \cdot 7,5}{1}(\text{N}_2) = 37,2 \text{ кмоль} / \text{кмоль}$$

Определим избыточный объем воздуха:

$$V_g^0 = 4,76 \cdot 7,5 \text{ кмоль} / \text{кмоль} = 35,6 \text{ кмоль} / \text{кмоль}$$

$$\Delta V_g = V_g^0 (\alpha - 1) = 35,6 \cdot (1,5 - 1) \text{ кмоль} / \text{кмоль} = 17,8 \text{ кмоль} / \text{кмоль}$$

Рассчитаем объем продуктов горения:

$$V_{n.z.} = V_{n.z.}^0 + \Delta V_{n.z.} = (37,2 + 17,8) \text{ кмоль} / \text{кмоль} = 55 \text{ кмоль} / \text{кмоль}$$

Таким образом, при сгорании 1 кмоль бензола при  $\alpha = 1,5$  выделяется 55 кмоль продуктов горения, имеющих следующий состав:

$$C_{CO_2} = \frac{V_{CO_2} * 100}{V_{n.z.}} = \frac{6 * 100}{55} = 10,9\%$$

$$C_{H_2O} = \frac{V_{H_2O} * 100}{V_{n.z.}} = \frac{3 * 100}{55} = 5,45\%$$

$$C_{N_2} = \frac{(V_{N_2} + \Delta V_g * 0,79) * 100}{V_{n.z.}} = \frac{(3,76 * 7,5 + 17,85 * 0,79) * 100}{55} = 76,91\%$$

$$C_{O_2} = \frac{V_{O_2} * 100}{V} = \frac{17,85 * 0,21 * 100}{55} = 6,75\%$$

2. Для нахождения объемов продуктов горения в  $\text{м}^3/\text{кг}$  и  $\text{м}^3/\text{м}^3$  определим объем 1 кмольгаза при условиях, в которых находятся продукты горения:

$$V_t = \frac{22,4 * T_{n.z.} * p_{атм}}{T_0 * p} = \frac{22,4 \text{ л} / \text{моль} * 1600 \text{ К} * 101325 \text{ Па}}{273 \text{ К} * 90000 \text{ Па}} = 147,8 \text{ м}^3 / \text{кмоль}$$

Тогда

$$V_{n.z.}^0 = \left[ \frac{6}{1} (CO_2) + \frac{3}{1} (H_2O) + \frac{3,76 * 7,5}{1} (N_2) \right] \frac{147,8 \text{ м}^3 / \text{кмоль}}{78 \text{ кг} / \text{кмоль}} = 70,5 \text{ м}^3 / \text{кг}$$

Рассчитаем избыточный объем воздуха

$$\Delta V_{возд} = \frac{4,76 * \beta_k * V_t}{M(C_6H_6)} * (\alpha - 1) = \frac{4,76 * 7,5 * 147,8 \text{ м}^3 / \text{кмоль}}{78 \text{ кг} / \text{кмоль}} * (1,5 - 1) = 33,8 \text{ м}^3 / \text{кг}$$

Объем продуктов горения

$$V_{n.z.} = 70,5 \text{ м}^3 / \text{кг} + 33,8 \text{ м}^3 / \text{кг} = 104,3 \text{ м}^3 / \text{кг}$$

3. Считая, что пары бензола имеют нормальную температур 273 К, определим теоретический объем продуктов горения в  $\text{м}^3/\text{м}^3$ :

$$V_{n.z.}^0 = \left[ \frac{6}{1} (CO_2) + \frac{3}{1} (H_2O) + \frac{3,76 * 7,5}{1} (N_2) \right] \frac{V_t}{V_m} = \left[ \frac{6}{1} (CO_2) + \frac{3}{1} (H_2O) + \frac{3,76 * 7,5}{1} (N_2) \right] \frac{147,8 \text{ м}^3 / \text{кмоль}}{22,4 \text{ м}^3 / \text{кмоль}} = 218,1 \text{ м}^3 / \text{м}^3$$

$$\Delta V_{возд} = \frac{4,76 * \beta_k * V_t}{V_m} * (\alpha - 1) = \frac{4,76 * 7,5 * 147,8 \text{ м}^3 / \text{кмоль}}{22,4 \text{ м}^3 / \text{кмоль}} * (1,5 - 1) = 117,7 \text{ м}^3 / \text{м}^3$$

$$V_{n.z.} = V_{n.z.}^0 + \Delta V_{\text{возд}} = (218,8 + 117,7) \text{ м}^3 / \text{м}^3 = 335,8 \text{ м}^3 / \text{м}^3$$

### Задание для самостоятельного решения

#### Задача №2

Определить объем и состав продуктов горения вещества в кмоль/кмоль и м<sup>3</sup>/кг при заданных коэффициенте избытка воздуха  $\alpha$ , температуре продуктов горения и давлении  $P$ .

Таблица 6

#### Данные для расчета

№ варианта	Вещество	$\alpha$	$T_{\text{п.г}}$ , К	$P$ , Па
1	Октан	1,3	1600	100 000
2	Пентан	1,4	1500	105 000
3	Пропан	1,2	1200	100 000
4	Бутан	1,25	1250	105 000
5	Пентан	1,35	1300	100 000
6	Гексан	1,45	1350	100 000
7	Гептан	1,5	1400	105 000
8	Октан	1,55	1450	105 000
9	Бензол	1,4	1500	100 000
10	Толуол	1,25	1550	105 000
11	Метан	1,3	1600	100 000
12	Этилен	1,35	1650	100 000
13	Ацетилен	1,4	1250	105 000
14	Этиловый спирт	1,45	1250	100 000
15	Октан	1,5	1300	100 000
16	Пентан	1,35	1400	105 000
17	Пропан	1,25	1350	100 000
18	Бутан	1,25	1250	105 000

19	Пентан	1,15	1450	100 000
20	Октан	1,2	1600	105 000
21	Октан	1,3	1250	100 000
22	Пентан	1,4	1300	105 000
23	Пропан	1,2	1350	100 000
24	Бутан	1,25	1400	105 000
25	Бутан	1,55	1250	100 000
26	Пентан	1,4	1300	105 000
27	Гексан	1,25	1350	100 000
28	Гептан	1,3	1400	105 000
29	Октан	1,35	1250	100 000
30	Бензол	1,4	1300	105 000

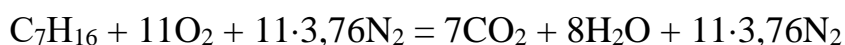
### Тема № 3. Горение жидкостей.

#### Расчёт объёмов воздуха, продуктов горения, теплового эффекта и температуры процесса горения жидкостей

##### *Теоретическая часть*

Как было рассмотрено выше, для газообразных горючих веществ расчет объемов воздуха и продуктов горения чаще всего проводят в м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>. Так как 1 кмоль любого газа в одинаковых условиях занимает один и тот же объем (при нормальных условиях 22,4 м<sup>3</sup>), то объем, рассчитанный в м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>, численно будет таким же, как и в кмоль/кмоль.

Если горючее вещество находится в конденсированном состоянии (жидком или твердом), то, как правило, расчеты объемов воздуха и продуктов горения проводят в м<sup>3</sup>/кг. Для этого кмоль воздуха или продукта горения переводят в м<sup>3</sup>, умножая на объем одного кмоль газа (22,4 м<sup>3</sup>/кмоль), а кмоль горючего переводят в кг, умножая на массу одного кмоль горючего ( $M_r$ , кг/кмоль). Например, при сгорании 1 кг гептана



требуется воздуха:

$$V_B^0 = \frac{(v_{O_2} + v_{N_2}) \cdot 22,4}{\nu_r M_r} = \frac{(11 + 11 \cdot 3,76) \cdot 22,4}{1 \cdot 100} = 11,7 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

образуется  $V_{CO_2} = \frac{\nu_{CO_2} \cdot 22,4}{\nu_r M_r} = \frac{7 \cdot 22,4}{1 \cdot 100} = 1,57 \text{ м}^3/\text{кг}$

и далее по химическому уравнению.

На практике чаще всего приходится иметь дело с горением жидкостей сложного химического состава (нефть, различные нефтепродукты, растворители и др.). Такие вещества содержат большое количество различных химических соединений различной молекулярной массы. Поэтому их состав характеризуют массовым содержанием химических элементов.

В таком случае расчет количества воздуха и продуктов сгорания ведут по каждому химическому элементу с учетом его процентного содержания в

горючем веществе. Например, при сгорании 1 кг углерода  $C+O_2+3,76N_2=CO_2+3,76N_2$  необходимое количество воздуха составит:

$$V_B^0 = \frac{(n_{O_2} + n_{N_2}) \cdot 22,4}{n_r M_r} = \frac{(1 + 3,76) \cdot 22,4}{1 \cdot 12} = 8 \text{ м}^3 / \text{кг}.$$

Если просуммировать объемы воздуха,  $\text{м}^3/\text{кг}$ , необходимые для сгорания всех элементов, обычно входящих в состав горючего органического вещества, с учетом их процентного содержания, можно получить общую расчетную формулу:

$$V_B^0 = 0,269 \cdot \left( \frac{C}{3} + H + \frac{S - O}{8} \right), \quad (16)$$

где C, H, S и O - содержание элементов в горючем, масс. %.

Для определения объема продуктов горения также могут быть получены общие расчетные формулы. Из уравнения химической реакции следует, что при сгорании 1 кг углерода образуется  $CO_2$  в количестве:

$$V_{CO_2} = \frac{n_{CO_2} \cdot 22,4}{n_r M_r} = \frac{1 \cdot 22,4}{1 \cdot 12} = 1,86 \text{ м}^3 / \text{кг}.$$

Тогда расчетная формула для определения количества  $CO_2$ ,  $\text{м}^3/\text{кг}$ , будет выглядеть так:

$$V_{CO_2} = 1,86 \frac{C}{100}. \quad (17)$$

Аналогично могут быть найдены расчетные формулы и для других продуктов горения:

$$V_{H_2O} = 11,2 \frac{H}{100} + 1,24 \frac{W}{100}; \quad (18)$$

$$V_{SO_2} = 0,7 \frac{S}{100}; \quad (19)$$

$$V_{N_2}^0 = \frac{1}{100} \left[ 7C + 21 \cdot \left( H - \frac{O}{8} \right) + 2,6S + 0,8N \right]. \quad (20)$$

При расчете объема паров воды учитывается влажность исходного горючего вещества ( $W$  - содержание влаги, масс. %).

При решении задач, связанных с горением веществ сложного состава, рекомендуется пользоваться готовыми формулами (1) – (5), а не выводить их каждый раз вновь.

*Расчёт теплового эффекта и температуры процесса горения жидкостей*

Температуру горения можно рассчитать по формуле:

$$T_{\Gamma} = T_0 + \frac{Q_H(1-\eta)}{c_{p_{CO_2}} V_{CO_2} + c_{p_{H_2O}} V_{H_2O} + c_{p_{N_2}} V_{N_2}^0 + c_{p_{возд}} \Delta V_B}. \quad (21)$$

Если горючая жидкость является сложным веществом, и его элементный состав задан в массовых процентах, то для расчета теплоты сгорания используют формулу Менделеева:

$$Q_H = 339,4C + 1257H - 108,9(O + N - S) - 25,1(9H + W), \text{кДж / кг}, \quad (22)$$

где С, Н, О, N, S - процентное содержание данного элемента в горючем веществе; W - содержание влаги в масс. %.

Горение горючих веществ и материалов происходит в результате нагревания их источником зажигания, т. е. теплом, поступающим из внешней среды. Кроме того, нагревание осуществляется также теплом, выделяющимся в зоне горения.

Температура горения — температура (зоны пламени), до которой нагреваются продукты реакции горения. Это максимальная температура зоны химической реакции (зоны пламени). Температуру горения рассчитывают по формуле:

$$Q_{n.g.}^{T_r} = \sum_{i=1}^k V_{n.g.} * C_{pi} (T_r - T_0); \quad (23)$$

Расчет температуры горения может быть произведен только методом последовательных приближений, поскольку теплоемкость газов зависит от температуры горения.

Для расчета температуры горения требуется определить параметры, приведенные в таблице 7.



Таблица 7

## Схема расчета температуры горения

Определяемые параметры	Примечание
1. Объем и состав продуктов горения	кмоль; м <sup>3</sup>
2. Низшая теплота горения или количество теплоты, пошедшей на нагрев продуктов горения (при наличии теплотерь)	$Q_{п.г.}$ или $Q_{н.}$ , кДж/моль, кДж/кг
3. Среднее значение энтальпии продуктов горения	$H_{cp} = \frac{Q_H(n.z.)}{\sum V_{n.z.}}$ ;
4. Температура горения $T_1$ по средней энтальпии, если $H_{cp}$ выражена в кДж/м <sup>3</sup> , ориентируясь на азот (наибольшее содержание в продуктах горения)	
5. Теплосодержание продуктов горения с температурой $T_1$	$Q'_{n.z.} = \sum H_i V_{n.z.}$ ;
6. Если $Q'_{п.г.} < Q_{н(п.г.)}$ , то $T_2 > T_1$ в том случае, если $Q'_{п.г.} < Q_{н(п.г.)}$ , то $T_2 < T_1$	$H_i$ — энтальпия $i$ -го продукта горения; $V_i$ — объем $i$ -го продукта горения
7. Расчет проводим до получения неравенства $Q'_{п.г.} < Q_{н(п.г.)} < Q''_{п.г.}$	
8. Температура горения	$T_2 = T_1 + \frac{(Q_H(n.z.) - Q'_{n.z.})(T_2 - T_1)}{Q''_{n.z.} - Q'_{n.z.}}$ ;

Действительная температура горения на пожаре для большинства газообразных, жидких и твердых веществ изменяется в достаточно узких пределах (1300—1800 К). В связи с этим расчетная оценка действительной

температуры горения может быть значительно упрощена, если теплоемкость продуктов горения выбирать при температуре 1500 К:

$$T_{n.z.} = T_0 \frac{Q_H}{\sum C^* p_i V_{n.z.}};$$

где  $C^* p_i$  — теплоемкость  $i$ -го продукта горения при 1500 К (таблица 2).

Таблица 8

Теплоемкость некоторых горючих газов

Вещество	Теплоемкость	
	кДж/м <sup>3</sup> ·К	кДж/моль · К
CO <sub>2</sub>	2,27	50,85·10 <sup>-3</sup>
SO <sub>2</sub>	2,28	51,07·10 <sup>-3</sup>
H <sub>2</sub> O	1,78	39,87·10 <sup>-3</sup>
N <sub>2</sub>	1,42	31,81·10 <sup>-3</sup>
Воздух	1,44	32,26·10 <sup>-3</sup>

### Примеры решения типовых задач

**Пример 1.** Определить адиабатическую температуру горения органической массы, состоящей из С – 60 %, Н – 7 %, О – 25 %, W – 8 %.

**Решение:**

1. Так как горючее представляет собой сложное вещество, рассчитаем состав продуктов горения:

$$V_{CO_2} = 1,86 * \frac{60}{100} = 1,12 \text{ м}^3 / \text{кг};$$

$$V_{CO_2} = 11,2 * \frac{7}{100} + 1,24 * \frac{8}{100} = 0,88 \text{ м}^3 / \text{кг};$$

$$V_{N_2} = \frac{1}{100} * 60 + 21 * \left( 7 - \frac{25}{6} \right) = 5,01 \text{ м}^3 / \text{кг};$$

Общий объем продуктов горения

$$V_{n.z.}^0 = 7,01 \text{ м}^3 / \text{кг}.$$

2. Определяем низшую теплоту сгорания вещества по формуле Менделеева:

$$Q_H = 339,4 - 60 - 1257 * 7 - 108,9 * 25 - 25,1(9 * 7 + 8) = 24658,4 \text{ кДж / кг.}$$

3. Определяем среднюю энтальпию продуктов горения

$$H_{cp} = \frac{24658,4}{7,01} = 3517,6 \text{ кДж / м}^3.$$

4. Так как величина энтальпии рассчитана в кДж/м<sup>3</sup>, ориентируясь на азот, принимаем T<sub>1</sub>=2300°C

5. Рассчитываем теплосодержание продуктов горения при 2300°C

$$Q = 5660,7 * 1,12 + 4667,1 * 0,88 + 3469,1 * 5,01 = 27827,2 \text{ кДж/кг}$$

6. Сравнивая Q<sub>H</sub> и Q'<sub>п.г.</sub> (Q<sub>H</sub> > Q'<sub>п.г.</sub>), выбираем вторую приближенную температуру, равную 1900°C.

7. Рассчитываем теплосодержание продуктов горения при 1900 °C:

$$Q_H = 4579,7 * 1,12 + 3693,5 * 0,88 + 2818,2 * 5,1 = 22498,8 \text{ кДж/кг}$$

8. Так как Q''<sub>п.г.</sub> < Q<sub>H</sub> < Q'<sub>п.г.</sub>, определяем температуру горения

$$T_2 = 1900 + \frac{(2395,4 - 22498,8)(23 - 1900)}{27872,2 - 22498,8} \approx 2010^0 \text{ C.}$$

### Задание для самостоятельного решения

Таблица 9

#### Данные для расчета

№ варианта	Состав, %			
	С	Н	О	W
1	61	5	27	7
2	59	6	28	7
3	60	7	27	6
4	58	8	28	6
5	57	9	29	5
6	56	10	28	6
7	55	9	23	3
8	54	8	34	4
9	53	7	34	6
10	52	6	32	10
11	51	5	36	8
12	50	4	38	8

13	49	3	40	8
14	48	2	42	8
15	47	8	39	6
16	49	9	35	7
17	45	7	40	8
18	44	6	41	9
19	43	5	59	11
20	42	4	44	10
21	60	6	27	7
22	60	6	25	9
23	48	4	40	8
24	47	6	41	6
25	49	9	35	7
26	48	4	40	8
27	46	6	40	8
28	46	4	42	8
29	44	8	40	8
30	46	6	40	8

## Тема № 4. Горение твердых веществ и материалов

### Теоретическая часть

При определении параметров процессов горения твёрдых материалов наиболее сложным является описание горения веществ сложного химического состава (древесина, торф и др.). Такие вещества содержат большое количество различных химических соединений с разной молекулярной массой. Их состав принято характеризовать массовым содержанием химических элементов. Например, древесина, состоящая из целлюлозы, гемицеллюлозы и лигнина, содержит примерно 50 % углерода С, 10 % водорода Н и 40 % кислорода О.

Тогда определение количества воздуха и продуктов сгорания ведут по каждому химическому элементу с учетом его процентного содержания в горючем веществе. Например, при сгорании 1 кг углерода  $C+O_2+3,76N_2=CO_2+3,76N_2$  необходимое количество воздуха составит:

$$V_B^0 = \frac{(n_{O_2} + n_{N_2})22,4}{n_r M_r} = \frac{(1 + 3,76) \cdot 22,4}{1 \cdot 12} = 8 \text{ м}^3 / \text{кг}.$$

Если просуммировать объемы воздуха, м<sup>3</sup>/кг, необходимые для сгорания всех элементов, обычно входящих в состав горючего органического вещества, с учетом их процентного содержания, можно получить общую расчетную формулу:

$$V_B^0 = 0,269 \left( \frac{C}{3} + H + \frac{S - O}{8} \right), \quad (24)$$

где С, Н, S и О - содержание элементов в горючем, масс. %.

Для определения объема продуктов горения также могут быть получены общие расчетные формулы. Из уравнения химической реакции следует, что при сгорании 1 кг углерода образуется CO<sub>2</sub> в количестве

$$V_{CO_2} = \frac{n_{CO_2} \cdot 22,4}{n_r M_r} = \frac{1 \cdot 22,4}{1 \cdot 12} = 1,86 \text{ м}^3 / \text{кг}.$$

Тогда расчетная формула для определения количества CO<sub>2</sub>, м<sup>3</sup>/кг, будет выглядеть так

$$V_{\text{CO}_2} = 1,86 \frac{C}{100} . \quad (25)$$

Аналогично могут быть найдены расчетные формулы и для других продуктов горения

$$V_{\text{H}_2\text{O}} = 11,2 \frac{H}{100} + 1,24 \frac{W}{100} ; \quad (26)$$

$$V_{\text{SO}_2} = 0,7 \frac{S}{100} ; \quad (27)$$

$$V_{\text{N}_2}^0 = \frac{1}{100} \left[ 7C + 21 \left( H - \frac{O}{8} \right) + 2,6S + 0,8N \right]. \quad (28)$$

При расчете объема паров воды учитывается влажность исходного горючего вещества ( $W$  - содержание влаги, масс. %).

При решении задач, связанных с горением веществ сложного состава, рекомендуется пользоваться готовыми формулами (24) – (28).

### Расчёт температуры горения твёрдых веществ

Температура горения определяется из уравнения:

$$T_{\Gamma} = T_0 + \frac{Q_{\text{H}}(1 - \eta)}{c_{p\text{CO}_2} V_{\text{CO}_2} + c_{p\text{H}_2\text{O}} V_{\text{H}_2\text{O}} + c_{p\text{N}_2} V_{\text{N}_2}^0 + c_{p\text{возд}} \Delta V_{\text{B}}}. \quad (29)$$

Так как в условии задачи не сказано о начальной температуре  $T_0$ , будем считать условия для горения нормальными. Так как размерность  $Q_{\text{H}}$  кДж/кг, а  $V_{\text{пр}}$  в м<sup>3</sup>/кг, теплоемкость необходимо взять в кДж/(м<sup>3</sup>·К), (табл.1).

Если горючее вещество является сложным, и его элементный состав задан в массовых процентах, то для расчета теплоты сгорания используют формулу Менделеева

$$Q_{\text{H}} = 339,4C + 1257H - 108,9(O + N - S) - 25,1(9H + W), \text{ кДж / кг}, \quad (30)$$

где  $C, H, O, N, S$  - процентное содержание данного элемента в горючем веществе;  $W$  - содержание влаги в масс. %.

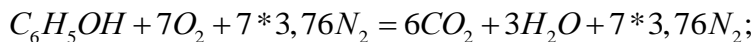
### Примеры решения типовых задач

**Пример 1.** Рассчитать действительную температуру горения фенола  $\Delta H_{\text{обр}} = 4,2$  кДж/моль, если потери тепла излучением составили 25 % от  $Q_{\text{H}}$ , а

коэффициент избытка воздуха при горении равен 2,2. Справочные данные представлены в *теме 1*.

*Решение.*

1. Определяем состав продуктов горения:



$$V_{CO_2} = 6 \text{ моль}$$

$$V_{H_2O} = 3 \text{ моль}$$

$$V_{N_2} = 26,32 \text{ моль}$$

$$\Delta V_g = (7 + 7 * 3,76)(2,2 - 1) = 39,98 \text{ моль}$$

$$V_{n.g.} = 75,3 \text{ моль};$$

2. Определяем низшую теплоту сгорания фенола

$$Q_H = 6 * 396,9 + 3 * 242,2 - 1 * 4,2 = 3103,8 \text{ кДж / моль};$$

3. Так как по условию задачи 25 % тепла теряется, определяем количество тепла, пошедшее на нагрев продуктов горения (теплосодержание продуктов горения при температуре горения):

$$Q = Q_H - (1 - \eta),$$

где  $\eta$  — доля теплопотерь в результате излучения энергии, химического и механического недожога.

$$Q_{n.g.} = 3103,8(1 - 0,25) = 2327,85 \text{ кДж / моль};$$

4. Определяем действительную температуру горения:

$$T_2^0 = 273 + \frac{2327,85}{10^{-3}(50,85 - 6 + 39,87 * 3 + 31,81 * 26,32 + 32,26 * 39,98)} = 1185,17 \text{ К}.$$

Ответ. Действительная температура горения равна 1185 К.

### Задачи для самостоятельного решения

Таблица 10

Данные для расчета

№	Вещество	$\alpha$	$\eta$
---	----------	----------	--------

варианта			
1	$C_2H_4$ (г) этилен	1,3	0,15
2	$C_3H_6$ (г) циклопропан	1,4	0,16
3	$C_6H_6$ (г) бензол	1,2	0,17
4	$C_7H_8$ (г) толуол	1,25	0,18
5	$C_2H_4$ (г) этилен	1,35	0,19
6	$C_3H_6$ (г) циклопропан	1,45	0,2
7	$C_6H_6$ (г) бензол	1,5	0,21
8	$C_7H_8$ (г) толуол	1,55	0,22
9	$C_2H_4$ (г) этилен	1,4	0,23
10	$C_3H_6$ (г) циклопропан	1,25	0,24
11	$C_6H_6$ (г) бензол	1,3	0,25
12	$C_7H_8$ (г) толуол	1,35	0,15
13	$C_2H_4$ (г) этилен	1,4	0,16
14	$C_3H_6$ (г) циклопропан	1,45	0,17
15	$C_6H_6$ (г) бензол	1,5	0,18
16	$C_7H_8$ (г) толуол	1,35	0,19
17	$C_2H_4$ (г) этилен	1,25	0,2
18	$C_3H_6$ (г) циклопропан	1,25	0,21
19	$C_6H_6$ (г) бензол	1,15	0,22
20	$C_7H_8$ (г) толуол	1,2	0,23
21	$C_2H_4$ (г) этилен	1,2	0,15
22	$C_3H_6$ (г) циклопропан	1,15	0,16
23	$C_6H_6$ (г) бензол	1,2	0,19
24	$C_7H_8$ (г) толуол	1,25	0,12
25	$C_2H_4$ (г) этилен	1,05	0,14
26	$C_3H_6$ (г) циклопропан	1,15	0,2
27	$C_6H_6$ (г) бензол	1,25	0,21
28	$C_7H_8$ (г) толуол	1,15	0,22
29	$C_2H_4$ (г) этилен	1,35	0,21
30	$C_3H_6$ (г) циклопропан	1,25	0,21



**Задача 2.** Определить действительную температуру горения древесины следующего состава: С = 45 %; Н = 5,0 %; S = 0 %; О = 35 %; N = 1 %; А = 4 %; W = 10 %, если горение протекает при  $\alpha_6 = 1,4$ . Недожог составляет 5 %  $Q_{\text{недож}}$ , а потери теплоты излучением составляют 10 %  $Q_{\text{н}}$ .

Начальные условия — нормальные.

**Решение.**

1. Определяем количество теплоты, затраченной на нагрев продуктов горения, по уравнению материально-теплового баланса:

$$Q_{\text{н.г.}} = (Q_{\text{н}} + Q_{\text{исх}} - Q_{\text{недож}} - Q_{\text{пот}}),$$

где  $Q_{\text{н}}$  — низшая теплота горения;

$Q_{\text{исх}} = 0$ , так как начальные условия нормальные,  $T_0 = 273 \text{ К}$ ;

$Q_{\text{недож}}$  — теплота недожога;

$Q_{\text{пот}}$  — теплота потери излучением.

Вычисляем количество теплоты, затраченной на нагрев продуктов горения:

$$Q_{\text{н.г.}} = (Q_{\text{н}} + (0 - 0,5Q_{\text{н}} - 0,1Q_{\text{н}})) = 0,85Q_{\text{н}};$$

2. По формуле Д.И. Менделеева (30) находим низшую теплоту горения древесины:  $Q_{\text{н}} = 339,4 * 45 + 1257 * 5 - 108,9(1 + 35 - 0) - 25,1(9 * 5 + 10) = 16257,1$  кДж/кг

$$Q_{\text{н.г.}} = 0,85 * 16257,1 \text{ кДж / кг} = 13818,54 \text{ кДж / кг};$$

Таким образом, на нагрев продуктов горения 1 кг древесины будет затрачено 13 818,54 кДж тепла.

3. Определяем объем и состав продуктов горения 1 кг древесины.

При сжигании древесины образуются углекислый газ ( $\text{CO}_2$ ) и вода ( $\text{H}_2\text{O}$ ), остается азот ( $\text{N}_2$ ).

Определяем объем продуктов сгорания по формуле:

$$V_{\text{н.г.}} = q * C'_p * T_{\text{гор}},$$

где  $q$  — теплосодержание продуктов сгорания кДж/моль; кДж/кг;  $C'_p$  — средняя теплоемкость продуктов сгорания, кДж/( $\text{м}^3 \cdot \text{К}$ ); ккал/( $\text{м}^3 \cdot \text{К}$ ).

Найдем объем продуктов сгорания 1 кг сложной смеси горючих веществ.

Отсюда имеем:

$$V_{CO_2} = 1,86 * 45 / 100 = 0,84 \text{ м}^3 / \text{кг}$$

$$V_{H_2O} = 11,2 * 5 / 100 + 1,24 * 10 / 100 = 0,68 \text{ м}^3 / \text{кг}$$

$$V_{N_2} = 0,017 * 45 + 21 * 5 + 2,63(1 - 35) = 3,31 \text{ м}^3 / \text{кг}$$

$$\Delta V = 0,266(45 / 3 + 5 - 35 / 8)(1,4 - 1) = 1,66 \text{ м}^3 / \text{кг}$$

Следовательно, при нормальных условиях продукты горения 1 кг древесины будут состоять из 0,84 м<sup>3</sup> CO<sub>2</sub>, 0,68 м<sup>3</sup> паров H<sub>2</sub>O, 3,31 м<sup>3</sup> N<sub>2</sub> и 1,66 м<sup>3</sup> воздуха. Общий объем продуктов горения (V<sub>п.г.</sub>) составит 6,49 м<sup>3</sup>/кг.

4. Находим температуру горения.

Определяем среднее теплосодержание единицы объема продуктов горения:

$$\Delta H_{cp} = Q_{n.e.}^{T_2} / V_{n.e.} = \frac{13818,5}{6,49} = 2129,2 \text{ кДж} / \text{м}^3$$

Это значит, что в каждом кубометре продуктов горения при температуре горения будет содержаться 3156,1 кДж тепла. Для дальнейших расчетов необходимо учитывать, что доля азота в продуктах горения: наиболее значительна, чем других компонентов горючей смеси.

Процентное содержание азота в продуктах горения азота 3,31 % и кислорода 1,66 % в составе воздуха. Отсюда определяем долю азота в продуктах горения:

$$\frac{3,31 + 1,66 * 0,79}{6,49} * 100\% = 71,2\%$$

где 0,79 – коэффициент, учитывающий содержание азота в воздухе.

При дальнейших расчетах исходим из того, что доля азота в продуктах горения составляет 71,2 %. Поэтому находим, при какой температуре удельное теплосодержание азота  $\Delta H_{N_2}$  соответствует найденной величине  $\Delta H_{cp}$  (2129,2 кДж/м<sup>3</sup>).

Видим, что эта температура находится между (1400–1500) + 273 К.

Принимая во внимание, что в состав продуктов горения входят также  $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$ , которые обладают таким же теплосодержанием ( $\Delta H_{\text{ср}} = 2129,2 \text{ кДж/м}^3$ ), но при более низких температурах, задаемся температурой  $(1400+273) \text{ К}$ . По этой температуре ( $1673 \text{ К}$ ) определяем суммарное теплосодержание продуктов горения:

$$Q_{\text{н.г.}}^{1673\text{К}} = \sum \Delta H_{\text{н.г.}i} * V_{\text{н.г.}i} = 2010 * 3,31 + 2035 * 1,66 + 3241,4 * 0,84 + 2560,9 * 0,68 = 14496,22 \text{ кДж}$$

Сравниваем полученные данные, а именно расчетное значение  $Q_{\text{п.г.}}^{\text{Тгор}}$  ( $13818,54 \text{ кДж}$ ) для  $1 \text{ кг}$  древесины и  $Q_{\text{п.г.}}$  при  $T = 1673 \text{ К}$  ( $14496,22 \text{ кДж}$ ).

Теплосодержание продуктов горения при  $T = 1673 \text{ К}$  выше  $Q_{\text{п.г.}} = 13818,54 \text{ кДж}$ , следовательно,  $T_{\text{г}} < 1673 \text{ К}$ . Учитывая, что для  $\Delta H_{\text{ср}} = 2129,2 \text{ кДж/м}^3$  температура находится между  $1300\text{—}1400 \text{ }^\circ\text{C}$ , задаем значение  $T = (1300 + 273) \text{ К}$  и вновь определяем теплосодержание продуктов горения аналогично рассмотренным выше расчетам:

$$Q_{\text{н.г.}}^{1673\text{К}} = 1861,2 * 3,31 + 1877,5 * 1,66 + 2979,1 * 0,84 + 2345,5 * 0,68 = 13374,61 \text{ кДж}$$

Теплосодержание продуктов горения при  $T = 1573 \text{ К}$  ниже расчетного:  $Q_{\text{п.г.}} = 13818,54 \text{ кДж}$ , следовательно,  $T_{\text{г}} > 1573 \text{ К}$ .

Таким образом, температура горения находится в интервале  $1573 - 1673 \text{ К}$ . Точное значение температуры горения, находим интерполяцией, считая, что в этом интервале температур теплосодержание продуктов горения линейно зависит от температуры.

При разности температур  $(1673 - 1573) = 100 \text{ К}$  теплосодержание изменится на:

$$14496,2 - 13374,61 = 1121,61 \text{ кДж}$$

Разность между теплотой горения и теплосодержанием

$$13818,54 - 13374,61 = 443,93 \text{ кДж}$$

Следовательно, истинная  $T_{\text{г}}$  будет равна

$$T_{\text{г}} = 1573 + \frac{443,93}{1121,61} = 1573,4 \text{ К}$$

*Ответ.* Температура горения составляет  $1573,4 \text{ К}$ .

Таблица 11

Данные для расчета

№ вариант а	$\alpha_e$	$Q_n, \%$	$Q_{недож}, \%$	Состав, %						
				С	Н	О	S	N	A	W
1	1,3	10	5	51	5	27	2	2	3	10
2	1,31	11	6	49	6	28	2	2	3	10
3	1,32	12	7	50	7	27	2	2	2	10
4	1,33	13	8	48	8	28	2	2	2	10
5	1,34	14	9	47	9	29	2	2	1	10
6	1,35	15	10	46	10	28	2	2	2	10
7	1,36	10	5	45	9	23	1	1	1	10
8	1,37	11	6	44	8	34	2	2	1	10
9	1,38	12	7	43	7	34	2	2	2	10
10	1,39	13	8	42	6	32	4	2	4	10
11	1,4	14	9	51	5	26	3	3	2	10
12	1,41	15	10	50	4	28	3	3	2	10
13	1,42	10	5	49	3	30	2	3	3	10
14	1,42	11	6	48	2	32	2	3	3	10
15	1,44	12	7	47	8	29	2	2	2	10
16	1,45	13	8	49	9	25	3	2	2	10
17	1,46	14	9	45	7	30	3	3	2	10
18	1,47	15	10	44	6	31	3	3	3	10
19	1,48	10	5	43	5	49	4	4	3	10
20	1,49	11	6	42	4	34	4	4	2	10
21	1,35	10	4	51	5	27	2	2	3	10
22	1,4	11	7	49	6	28	2	2	3	10
23	1,45	12	10	50	7	27	2	2	2	10
24	1,35	13	12	48	8	28	2	2	2	10
25	1,39	14	10	47	9	29	2	2	1	10
26	1,36	10	7	51	5	27	2	2	3	10
27	1,34	14	9	51	5	27	2	2	3	10
28	1,35	15	10	49	6	28	2	2	3	10
29	1,36	10	5	50	7	27	2	2	2	10
30	1,37	11	6	48	8	28	2	2	2	10

## 2.2. Практическое приложение теории горения в пожарном деле

### Тема №5. Показатели пожарной опасности

#### Расчет концентрационных пределов воспламенения вещества

Процесс горения является основой любого пожара. Горение, как правило, происходит в газовой фазе. Поэтому горючие вещества, находящиеся в конденсированном состоянии (жидкости, твердые вещества), для возникновения и поддержания горения должны подвергаться газификации (испарению, разложению), в результате которой образуются горючие пары и газы в количестве, достаточном для горения.

Внешнее проявление горения – пламя, которое характеризуется свечением и выделением тепла. Возникшее в результате воспламенения пламя само становится источником потока тепла и химически активных частиц в прилегающие слои свежей горючей смеси, за счет чего обеспечивается перемещение фронта пламени. Движение пламени по газовой смеси называется *распространением пламени*.

Одними из основных показателей, характеризующих предельные условия возникновения горения, являются нижний и верхний концентрационные пределы распространения пламени (НКПРП и ВКПРП).

*Нижний (верхний) концентрационный предел распространения пламени (НКПРП и ВКПРП)* – минимальное (максимальное) содержание горючего вещества в однородной смеси с окислительной средой, при которой возможно распространение пламени по смеси на любое расстояние от источника зажигания.



**Рисунок 1** – Зависимость концентрационных пределов от содержания окислителя

*Температурные пределы распространения пламени (ТПРП, °С)* – такие температуры вещества, при которых его насыщенный пар образует в окислительной среде концентрации, равные соответственно нижнему (нижний

температурный предел, НТПРП), и верхнему (верхний температурный предел, ВТПРП) концентрационным пределам распространения пламени.

Сущность метода определения температурных пределов заключается в термостатировании исследуемой жидкости при заданной температуре в закрытом реакционном сосуде, содержащем воздух, испытании на зажигание паровоздушной смеси и установлении факта наличия или отсутствия распространения пламени. Изменяя температуру испытания, находят также ее значения (минимальное и максимальное), при которых насыщенный пар образует с воздухом смесь, способную воспламениться от источника зажигания и распространять пламя в объеме реакционного сосуда.

Значения температурных пределов распространения пламени применяют:

- при разработке мероприятий по обеспечению пожаровзрывобезопасности объекта в соответствии с требованиями действующих нормативных документов;
- при расчете пожаровзрывобезопасных температурных режимов работы технологического оборудования;
- при оценке аварийных ситуаций, связанных с разливом горючих жидкостей;
- для расчета концентрационных пределов распространения пламени;
- в стандартах или технических условиях на горючие жидкости.

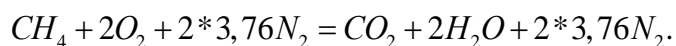
### **Задачи для самостоятельного решения**

**Задача 1.** Определить концентрационные пределы воспламенения вещества.

**Решение.**

Рассмотрим определение ВКПР И НКПР на примере метана

Запишем термохимическое уравнение горения метана:



НКПВ:  $a^* = 8,684$ ,  $b^* = 4,679$ ; ВКПР:  $a^* = 1,55$ ,  $b^* = 0,56$ .

Таблица 12

Значения констант а и b для определения КПВ по аппроксимационной формуле  $n_{O_2}$  (стехиометрического коэффициента перед кислородом в реакции горения)

Концентрационные пределы воспламенения	Значения коэффициентов	
	a	b
Нижний предел	8,684	4,679
Верхний предел $\eta_{O_2} \leq 7,5$	1,55	0,560
$\eta_{O_2} > 7,5$	0,768	6,554

$$C_{H(e)} = \frac{100}{a^* * n^* + b^*};$$

$$C_H = \frac{100}{8,684 * 2 + 4,679} = 4,55\%;$$

$$C_e = \frac{100}{1,55 * 2 + 0,56} = 27,3\%;$$

Таблица 13

Данные для расчета

№ варианта	Вещество
1	$C_2H_4$ (г) этилен
2	$C_3H_6$ (г) циклопропан
3	$C_6H_6$ (г) бензол
4	$C_7H_8$ (г) толуол
5	$C_2H_4$ (г) этилен
6	$C_3H_6$ (г) циклопропан
7	$C_6H_6$ (г) бензол
8	$C_7H_8$ (г) толуол
9	$C_2H_4$ (г) этилен
10	$C_3H_6$ (г) циклопропан
11	$C_6H_6$ (г) бензол
12	$C_7H_8$ (г) толуол
13	$C_2H_4$ (г) этилен
14	$C_3H_6$ (г) циклопропан
15	$C_6H_6$ (г) бензол

16	C <sub>7</sub> H <sub>8</sub> (г) толуол
17	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> (г) этилен
18	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> (г) циклопропан
19	C <sub>6</sub> H <sub>6</sub> (г) бензол
20	C <sub>7</sub> H <sub>8</sub> (г) толуол
21	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> (г) этилен
22	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> (г) циклопропан
23	C <sub>6</sub> H <sub>6</sub> (г) бензол
24	C <sub>7</sub> H <sub>8</sub> (г) толуол
25	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> (г) этилен
25	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> (г) циклопропан
26	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> (г) циклопропан
27	C <sub>6</sub> H <sub>6</sub> (г) бензол
28	C <sub>7</sub> H <sub>8</sub> (г) толуол
29	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> (г) этилен
30	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> (г) циклопропан

**Пример 2.** Определить температурные пределы воспламенения ацетона, если концентрационные пределы составляют: НКПВ = 2,2 %, ВКПВ = 13 %. Атмосферное давление равно 101325 Па.

**Решение.**

Находим давления насыщенных паров жидкости, соответствующие нижнему и верхнему пределам воспламенения:

$$P_{н.п.} = \frac{НКПВ * p_{атм}}{100} = \frac{2,2 * 101325}{100} = 2229,15 Па$$

$$P_{в.п.} = \frac{ВКПВ * p_{атм}}{100} = \frac{13 * 101325}{100} = 13172,3 Па$$

Нижний температурный предел воспламенения ацетона находится между температурами 241,9 и 252,2 К при давлениях  $P_{max} = 2666,4$  и  $P_{min} = 1333,2$  Па, а верхний – между 271,0 и 280,7 К при давлениях  $P_{max} = 13\ 332,3$  и  $P_{min} = 7999,3$  Па. Методом линейной интерполяции определяем нижний и верхний температурные пределы воспламенения:



$$T_H = T_{\min} + \frac{(T_{\max} - T_{\min}) * (P_H - P_{\min})}{P_{\max} - P_{\min}} =$$

$$= 241,9 + \frac{(252,2 - 241,9)(2229,15 - 1333,2)}{2666,4 - 1333,2} = 248,8K$$

$$T_g = T_{\min} + \frac{(T_{\max} - T_{\min}) * (P_g - P_{\min})}{P_{\max} - P_{\min}} =$$

$$= 271 + \frac{(280,7 - 271)(13172,3 - 7999,3)}{13332,3 - 7999,3} = 280K$$

### **Расчёт минимальной флегматизирующей концентрации**

#### ***Расчет минимальной флегматизирующей концентрации инертных разбавителей и минимального взрывоопасного содержания кислорода***

Добавление в горючую смесь инертных газообразных разбавителей (азот, диоксид углерода, аргона, гелия, паров воды) приводит к значительному снижению концентрационной области ее воспламенения. Такое влияние инертных газов называют флегматизирующим, а вещества, обладающие этим качеством, – *флегматизаторами*. Существует минимальная концентрация флегматизатора в горючей смеси, при которой и выше которой смесь теряет способность к воспламенению при любом соотношении горючего и окислителя, эта концентрация называется *минимальной флегматизирующей концентрацией (МФК)*.

Изменение концентрационных пределов распространения пламени (КПРП) при этом зависит от природы и концентрации вещества, используемого в качестве флегматизатора. Влияние флегматизаторов на величину КПРП определяется их физическими характеристиками – теплоёмкостью и теплопроводностью. Чем выше теплоёмкость газа-разбавителя при одной и той же теплопроводности, тем выше эффективность его флегматизирующего действия. При увеличении концентрации флегматизатора в горючей смеси верхняя граница КПРП ( $\varphi_v$ ) уменьшается, а нижняя ( $\varphi_n$ ), как правило, незначительно увеличивается. При некоторой определённой для каждого флегматизатора концентрации нижний и верхний концентрационные пределы сливаются (рисунок 2).

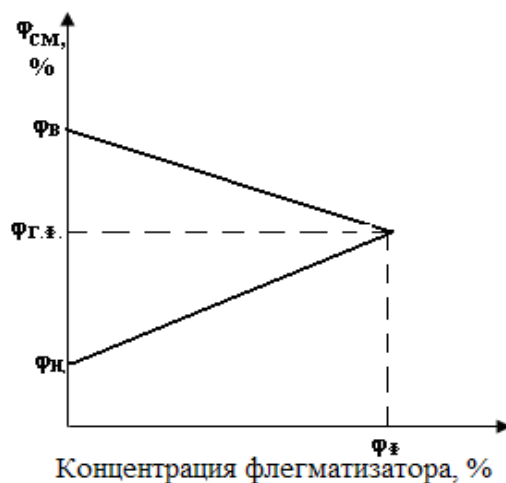


Рисунок 2- Механизм действия флегматизатора

МФК – это наименьшая концентрация флегматизатора в смеси с горючим и окислителем, при которой смесь становится неспособной к распространению пламени при любом соотношении горючего и окислителя. По сути МФК – это минимальное количество флегматизатора, которое необходимо ввести в газоздушную смесь стехиометрического состава, чтобы она стала негорючей. При этом происходит слияние нижнего и верхнего концентрационных пределов.

Минимальную флегматизирующую концентрацию можно рассчитать исходя из того, что адиабатическая температура горения смеси стехиометрического состава не может быть меньше 1500 К.

Уравнение для расчёта адиабатной температуры горения стехиометрической смеси, содержащей флегматизатор, имеет вид

$$T_{\Gamma} = T_0 + \frac{Q_{\text{н}}}{\sum C_{\text{P}_i} V_{\text{пр}_i} + C_{\text{P}_\phi} V_{\phi}}, \quad (31)$$

где  $V_{\text{пр}_i}$  – объём  $i$ -го продукта горения,  $\text{м}^3/\text{м}^3$ ;  $V_{\phi}$  – объём флегматизатора,  $\text{м}^3/\text{м}^3$ .

Отсюда объём флегматизатора будет равен

$$V_{\phi} = \frac{Q_{\text{н}} - (T_{\Gamma} - T_0) \sum C_{\text{P}_i} V_{\text{пр}_i}}{(T_{\Gamma} - T_0) C_{\text{P}_\phi}}, \quad (32)$$

Его минимальная флегматизирующая концентрация в стехиометрической смеси составит

$$\varphi_{\phi} = \frac{V_{\phi} \cdot 100}{V_{\Gamma} + V_{O_2} + V_{N_2} + V_{\phi}}. \quad (33)$$

Концентрация горючего в смеси, соответствующая точке флегматизации, рассчитывается по уравнению:

$$\varphi_{\Gamma\phi} = \frac{V_{\Gamma} \cdot 100}{V_{\Gamma} + V_{O_2} + V_{N_2} + V_{\phi}}. \quad (34)$$

Концентрация кислорода в этой же смеси (в точке флегматизации) называется *минимальным взрывоопасным содержанием кислорода* (МВСК) – это такая концентрация кислорода в смеси, состоящей из горючего вещества, воздуха и флегматизатора, ниже которой распространение пламени в горючей смеси невозможно при любой концентрации горючего.

МВСК рассчитывается по формуле:

$$\varphi_{O_2\phi} = \frac{100 - \varphi_{\phi}}{4,844}. \quad (35)$$

Безопасная концентрация кислорода принимается с некоторым запасом по отношению к МВСК и рассчитывается по формуле

$$\varphi_{O_2\text{без}} = 1,2\varphi_{O_2\phi} - 4,2. \quad (36)$$

### Задачи для самостоятельного решения

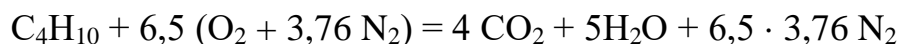
**Задача 1.** Определить значение МФК и безопасную концентрацию кислорода при разбавлении бутановоздушной смеси азотом, если низшая теплота сгорания бутана  $Q_n = 2010$  кДж/моль,  $T_{\Gamma} = 1500$  К. Построить зависимость концентрационных пределов распространения пламени от концентрации флегматизатора, учитывая, что нижний и верхний концентрационные пределы распространения пламени для смеси бутана с воздухом равны 1,86–8,14 об. % .

*Решение.*

Минимальную флегматизирующую концентрацию находим из условия минимальной адиабатической температуры горения стехиометрической бутано-воздушной смеси, где  $T_{\Gamma} = 1500 \text{ К}$ .

$$\varphi_{\Phi} = \frac{V_{\Gamma} \cdot 100}{V_{\Gamma} + V_{O_2} + V_{N_2} + V_{\Phi}}.$$

Согласно уравнению материального баланса:



$$V_{CO_2} = 4 \text{ м}^3/\text{м}^3; V_{H_2O} = 5 \text{ м}^3/\text{м}^3; V_{N_2} = 6,5 \cdot 3,76 = 24,44 \text{ м}^3/\text{м}^3.$$

Объем флегматизатора в составе предельной по горючести стехиометрической смеси будет равен

$$V_{\Phi} = \frac{2010 - (1500 - 273) \cdot (4 \cdot 5,08 \cdot 10^{-2} + 5 \cdot 3,99 \cdot 10^{-2} + 24,44 \cdot 3,18 \cdot 10^{-2})}{(1500 - 273) \cdot 3,18 \cdot 10^{-2}} =$$

$$= 14,4 \text{ м}^3/\text{м}^3.$$

Минимальная флегматизирующая концентрация паров азота составит

$$\varphi_{\Phi} = \frac{V_{\Phi} \cdot 100}{V_{\Gamma} + V_{O_2} + V_{N_2} + V_{\Phi}} = \frac{14,4 \cdot 100}{1 + 6,5 + 24,44 + 14,4} = 31,1 \text{ об. \%}.$$

Концентрация горючего в точке флегматизации

$$\varphi_{\Gamma\Phi} = \frac{V_{\Gamma} \cdot 100}{V_{\Gamma} + V_{O_2} + V_{N_2} + V_{\Phi}} = \frac{1 \cdot 100}{1 + 6,5 + 24,44 + 14,3} = 2,2 \text{ об. \%}$$

По полученным данным строим зависимость КПРП от концентрации флегматизатора (рис. 2).

Концентрация кислорода в точке флегматизации (МВСК) составит

$$\varphi_{O_2\Phi} = \frac{100 - \varphi_{\Phi}}{4,844} = \frac{100 - 31,1}{4,844} = 14,2 \text{ об. \%}.$$

Значение безопасной концентрации кислорода для бутано-воздушной смеси с азотом составит

$$\varphi_{O_2\text{без}} = 1,2 \cdot \varphi_{O_2\Phi} - 4,2 = 1,2 \cdot 14,2 - 4,2 = 12,7 \text{ об. \%}.$$

### *Решение индивидуальных задач по вариантам*

Рассчитать минимальную флегматизирующую концентрацию инертного разбавителя, об. %, исходя из значения минимальной адиабатической температуры горения паровоздушной смеси вещества А ( $T_r = 1500\text{K}$ ) при разбавлении её флегматизатором Ф (табл. 2), а также минимальное взрывоопасное содержание кислорода и безопасную концентрацию кислорода.

Таблица 14

Данные для расчетов

Номер варианта	Название вещества А	Химическая формула	Флегматизатор Ф
1	Пентан	$C_5H_{12}$	Азот
2	Гексан	$C_6H_{14}$	Водяной пар
3	Пропанол - 1	$C_3H_8O$	Диоксид углерода
4	Водород	$H_2$	Азот
5	Бутан	$C_4H_{10}$	Водяной пар
6	Метиловый спирт	$CH_4O$	Диоксид углерода
7	Ацетон	$CH_3COCH_3$	Азот
8	Амиловый спирт	$C_5H_{12}O$	Диоксид углерода
9	Пропилен	$C_3H_6$	Диоксид углерода
10	Аммиак	$NH_3$	Водяной пар
11	Пропан	$C_3H_8$	Диоксид углерода
12	Ацетилен	$C_2H_2$	Азот
13	Толуол	$C_7H_8$	Диоксид углерода
14	Бензол	$C_6H_6$	Азот
15	Этан	$C_2H_4$	Диоксид углерода
16	Этиловый спирт	$C_2H_6O$	Диоксид углерода
17	Этилен	$C_2H_4$	Азот
18	Сероводород	$H_2S$	Водяной пар
19	Диэтиловый эфир	$C_4H_{10}O$	Диоксид углерода
20	Окись углерода	$CO$	Азот
21	Пропилен	$C_3H_6$	Азот
22	Аммиак	$NH_3$	Водяной пар
23	Пропан	$C_3H_8$	Диоксид углерода
24	Ацетилен	$C_2H_2$	Азот
25	Толуол	$C_7H_8$	Диоксид углерода
26	Пропилен	$C_3H_6$	Диоксид углерода
27	Толуол	$C_7H_8$	Азот
28	Бензол	$C_6H_6$	Водяной пар
29	Этан	$C_2H_4$	Диоксид углерода
30	Толуол	$C_7H_8$	Азот

## Тема № 6. Параметры и классификация пожаров

*Площадь пожара*  $S_{\text{п}}$  – площадь проекции зоны горения на горизонтальную или вертикальную плоскость. На практике, как правило, используют горизонтальную проекцию. Данный параметр является нормативным.

Он служит для оценки обстановки на пожаре, расчета сил и средств, необходимых для его тушения. Однако при горении изделий и конструкций из твердых горючих материалов (ТГМ) площадь пожара, как правило, не соответствует физической площади горения.

*Площадь поверхности горения*  $S_{\text{пг}}$  – характеризует реальную, физическую площадь ТГМ, которая участвует в горении, т. е. выделяет горючие газы при пиролизе или испарении, а также взаимодействует с окислителем в гетерогенном режиме. Величина  $S_{\text{пг}}$  определяет количество образующихся газообразных продуктов и, соответственно, размеры зоны горения.

*Коэффициент поверхности горения*  $K_{\text{пг}}$  – отношение площади поверхности горения к площади пожара:

$$K_{\text{п.г.}} = \frac{S_{\text{п.г.}}}{S_{\text{п}}}, \quad (37)$$

Из данного выражения следует, что площадь горения превышает площадь пожара в  $K_{\text{пг}}$  раз. Например, в современных квартирах значение  $K_{\text{пг}}$  составляет 3-5. Следовательно, если площадь пожара  $3\text{ м}^2$ , то площадь горения и, соответственно площадь тушения, составляет  $9 \div 15\text{ м}^2$ .

*Линейная скорость распространения пожара*  $v_{\text{л}}$  – путь, который на данном объекте проходит фронт пламени в единицу времени, м/мин. Фактически это скорость распространения зоны горения по площади объекта.

Если горючим веществом на объекте является жидкость, то скорость распространения пожара практически равна скорости распространения

пламени по поверхности жидкости. В зависимости от соотношения начальной температуры жидкости  $T_0$  и температуры воспламенения  $T_{\text{вп}}$  значение может изменяться в 10 раз. Так, если  $T_0 < T_{\text{вп}}$ , то  $v_{\text{л}}$  редко превышает

0,05м/с. При  $T_0 > T_{вп}$  линейная скорость равна скорости распространения пламени по паровоздушным смесям – 0,5м/с и более.

Если горючая нагрузка состоит из ТГМ, то  $v_{л}$  зависит не только от скорости распространения пламени по поверхности ТГМ, но и от скорости

его перехода с одного предмета на другой. Поэтому на  $v_{л}$  влияет также характер размещения горючих изделий и материалов на объекте, интенсивность теплового излучения, направление и скорость газовых потоков. При рассредоточенной пожарной нагрузке интенсивности излучения от горящего предмета может быть недостаточно для воспламенения материалов соседних предметов. Тогда пожар не распространится на всю площадь объекта и останется локальным.

Величина  $v_{л}$  зависит также от состава газовой среды, поступающей в зону горения. Так, на внутренних пожарах, по мере развития процесса горения, концентрация кислорода в газовой среде уменьшается, температура пламени и, соответственно, его излучательная способность снижаются.

Это приводит к уменьшению скорости распространения пламени по поверхности горючего. Вместе с тем, температура газовой среды в помещениях часто достигает температуры воспламенения материалов до того как пожар охватит все помещение. В этих случаях перед фронтом пламени образуется газоздушная смесь на нижнем концентрационном пределе, по которой пламя распространяется со скоростью до 50 м/с, т.е. практически мгновенно. Это явление называется общей вспышкой.

Таким образом, линейная скорость распространения пожара зависит от очень многих факторов, прогнозировать которые чрезвычайно сложно.

По этому при пожарно-технических расчетах используют усредненные значения  $v_{л}$ , полученные в результате анализа параметров пожаров на различных объектах.

*Массовая скорость выгорания абсолютная*  $v_{м}^{abc}$  — масса горючего вещества, сгорающая в единицу времени.

Удельная массовая скорость выгорания  $v_m^{yd}$  – масса горючего вещества или материала, выгорающая в единицу времени с единицы площади пожара:

$$v_m^{yd} = \frac{V_m^{abc}}{S_n}, \quad (38)$$

Приведенная массовая скорость выгорания  $v_m^{np}$  – масса горючего вещества или материала, выгорающая в единицу времени с единицы площади поверхности горения:

$$v_m^{np} = \frac{V_m^{abc}}{S_{n.z.}}, \quad (39)$$

Теплота пожара  $q_n$ , кВт, – количество тепла, выделяющееся в зоне горения в единицу времени:

$$q_n = \beta * v_m^{abc} * Q_H, \quad (40)$$

где  $Q_H$  – низшая теплота сгорания материала, кДж/кг;  $\beta$  – коэффициент полноты сгорания (0,75 – 0,9).

*Температура пожара.* Температурой внутреннего пожара считается среднеобъёмная температура газовой среды в помещении, температурой открытого пожара – максимальная температура пламени.

*Коэффициент избытка воздуха* на внутреннем пожаре – отношение фактического расхода воздуха  $G_B^\phi$  к требуемому  $G_B^0$ :

$$\alpha = \frac{G_B^\phi}{G_B^0}, \quad (41)$$

*Требуемый расход воздуха  $G_B^0$* , кг/с, – расход воздуха, необходимый для полного сгорания материала с данной массовой скоростью:

$$G_B^0 = v_m^{yd} * S_n * V_B^0 * \rho_B, \quad (42)$$

где  $v_m^{yd}$  – удельная массовая скорость выгорания, кг/(м<sup>2</sup>с),  $S_n$  – площадь пожара, м<sup>2</sup>;  $V_B^0$  – теоретический объём воздуха необходимый для горения, м<sup>3</sup>/кг;  $\rho_B$  – плотность воздуха, кг/м<sup>3</sup>.

*Фактический расход воздуха  $G_B^\phi$* , кг/с, – масса воздуха, поступающего в помещение при пожаре в единицу времени. При газообмене через один проем или несколько проемов, расположенных на одном уровне:



$$G_6^\phi = \frac{2}{3} \mu B h_0 \sqrt{2gh_0 \rho_6 (\rho_6 - \rho_{н.з.})}, \quad (43)$$

где  $\mu$  – коэффициент сопротивления проёма ( $\mu = 0,6 - 0,7$ );  $B$  – ширина проёма, м;  $h_0$  – высота ПРД относительно нижней отметки проема, м;  $g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;  $\rho_в$  – плотность воздуха, кг/м<sup>3</sup>;  $\rho_{пр}$  – плотность продуктов горения, кг/м<sup>3</sup>.

*Высота плоскости равных давлений  $h_0$*  – расстояние от плоскости равных давлений ПРД до нижней отметки проема.

Коэффициент избытка воздуха связан с концентрацией кислорода соотношением:

$$\alpha = \frac{21}{21 - \phi_{O_2}}, \quad (44)$$

При газообмене через один проем или несколько проемов, расположенных на одинаковом расстоянии от пола, величину  $h_0$ , рассчитывают по формуле:

$$h_0 = \frac{H_{пр}}{1 + \sqrt[3]{\frac{\rho_6}{\rho_{н.з.}}}} = \frac{H_{пр}}{1 + \sqrt[3]{\frac{T_6}{T_{н.з.}}}}, \quad (45)$$

где  $H_{пр}$  – высота проема, м;  $T_{п}$ ,  $T_в$  – температура пожара и наружного воздуха соответственно, К.

Оценить плотность продуктов горения при заданной температуре можно по формуле, вытекающей из уравнения Менделеева - Клапейрона:

$$\rho_{н.з.} = \rho_6 \frac{T_6}{T_n}, \quad (46)$$

где  $T_в$  и  $T_{п}$  – температура воздуха и пожара соответственно, К.

При расчетах принимается  $T_в = 293\text{К}$ , соответственно  $\rho_в = 1,2 \text{ кг/м}^3$ .

Тогда:

$$\rho_{н.з.} \approx \frac{352}{T_n}, \text{ кг/м}^3 \quad (47)$$

Параметры пожаров в помещениях сильно зависят от свойств, количества и характера размещения горючих веществ и материалов.

Суммарная масса горючих веществ и материалов, приходящихся на  $1\text{ м}^2$  площади их размещения  $S$ , называется *удельной горючей нагрузкой*  $\rho_{гн}, \text{ кг/м}^2$ , и определяется по формуле:

$$\rho_{гн.} = \frac{\sum m_i}{S}, \quad (48)$$

где  $m_i$  – масса  $i$ -го горючего материала, кг;  $S$  – площадь размещения,  $\text{ м}^2$ .

*Площадью размещения* называется площадь участка, выделенного ограждающими конструкциями или противопожарными разрывами, на котором находятся горючие вещества и материалы. Если участки в помещении, на которых находятся горючие вещества и материалы, не разделены преградами с нормируемым пределом огнестойкости или проходами (проездами), ширина которых больше требуемых, площадь размещения равна площади пола.

Все горючие вещества и материалы, находящиеся на объекте, являются потенциальными источниками энергии, которые при пожаре выделяют

тепло. Поэтому при характеристике степени пожарной опасности объектов

используется *удельная пожарная нагрузка*  $g_{пн}, \text{ МДж/м}^2$ , – количество тепла, выделяемое горючей нагрузкой при полном сгорании:

$$g_{пн.} = \frac{\sum m_i Q_{Hi}}{S}, \quad (49)$$

где  $Q_{Hi}$  – низшая теплота сгорания  $i$ -го горючего вещества или материала,  $\text{ кДж/кг}$ .

Различают постоянную и временную пожарную нагрузку. К постоянной пожарной нагрузке относятся сгораемые элементы строительных конструкций здания и стационарно установленного оборудования. К временной нагрузке относят складированные горючие материалы, сырье, полуфабрикаты, мебель и т.п. Пожарная нагрузка всего помещения определяется как сумма постоянной и временной нагрузки.

Задачи 1 и 2 решаются с использованием формул (37) – (49). При этом для определения некоторых параметров может потребоваться трансформация исходных формул. Например, температуру внутреннего пожара можно оценить

по величине  $h_0$ , выразив ее из формулы (44). Концентрация кислорода в продуктах горения  $\phi_{O_2}$  и коэффициент избытка воздуха  $\alpha$  связаны соотношением (44). Отсюда:

$$\phi_{O_2} = 21(\alpha - 1) / \alpha, \quad (50)$$

Формула для определения площади пожара  $S_{п}$ , при которой  $\phi_{O_2}$  снижается до заданного значения выводится из формул (41), (42).

### *Примеры решения*

**1. Определить абсолютную массовую скорость выгорания материала при площади пожара 10 и 20 м<sup>2</sup> при значениях удельной массовой скорости выгорания**

#### *Пример решения.*

Удельная массовая скорость выгорания  $v_m^{ab}$ , как следует из определения, это абсолютная массовая скорость выгорания, приведенная к единице площади пожара  $S_{п}$ . Таким образом:

$$v_m^{ab} = v_m^{np} * S_n$$

$$S_n = 10 \text{ м}^2 * v_m^{ab} = 0,01 * 10 = 0,1 \text{ кг} / \text{с}$$

$$S_n = 20 \text{ м}^2 * v_m^{ab} = 0,01 * 20 = 0,2 \text{ кг} / \text{с}$$

**2. Определить теплоту пожара при горении материала, имеющего низшую теплоту сгорания (А) кДж/кг, если табличное значение удельной массовой скорости выгорания равно 0,02 кг/(м<sup>2</sup>·с), площадь пожара (Б) м<sup>2</sup>, коэффициент полноты сгорания (В) 0,8.**

#### *Пример решения.*

$$q_n = \beta v_m^{ab} S_{п} Q_H$$

$$q_n = 0,8 * 0,02 \text{ кг} / \text{м}^2 \cdot \text{с} * 10 \text{ м}^2 * 10000 \text{ кДж} / \text{кг} = 1600 \text{ кДж} / \text{с} = 1600 \text{ кВт}$$

### *Задания для самостоятельного решения*

**Задача 1.** Рассчитать требуемый расход воздуха при горении в помещении ацетона в емкости диаметром 1,5 м, если удельная массовая скорость выгорания  $v_m^{уд}$  равна 0,1 кг/(с·м<sup>2</sup>), теоретический объем воздуха

$V_B^0$  составляет 7,35 м<sup>3</sup>/кг. Температура окружающей среды 20 °С, давление нормальное.

**Решение.**

Расчетная формула для определения требуемого расхода воздуха имеет вид:

$$G_g^0 = v_m^{уд} * S_n * V_g^0 * \rho_g,$$

Площадь резервуара составляет

$$S_n = \pi r^2 = 3,14 * (1,5 / 2)^2 = 1,766 \text{ м}^2,$$

Плотность воздуха при данных условиях принимается 1,2 кг/м<sup>3</sup>.

Требуемый расход воздуха равен:

$$G_g^0 = 0,1 * 7,35 * 1,766 * 1,2 = 1,54 \text{ кг} / \text{с}.$$

Таблица 15

Данные для расчета

№ варианта	d, м	$v_m^{уд}$ , кг/(с·м <sup>2</sup> )	$V_B^0$ , м <sup>3</sup> /кг	Температура окружающей среды, °С
1	1	0,1	7,35	15
2	1,1	0,11	7,4	16
3	1,2	0,12	7,5	17
4	1,3	0,13	7,6	18
5	1,4	0,14	7,7	19
6	1,5	0,15	7,8	20
7	1,6	0,16	7,9	21
8	1,7	0,17	8,15	22
9	1,8	0,18	8,25	23
10	1,9	0,19	8,35	24
11	2	0,2	8,45	25
12	1	0,21	8,55	21
13	1,1	0,22	8,65	22
14	1,2	0,23	8,75	23
15	1,3	0,24	8,85	21
16	1,4	0,25	8,95	20

17	1,5	0,26	9,05	19
18	1,6	0,27	9,15	18
19	1,7	0,28	9,25	17
20	1,8	0,29	9,35	16
21	1	0,1	7,5	17
22	1,1	0,11	7,6	18
23	1,2	0,12	7,7	19
24	1,3	0,13	7,8	20
25	1,4	0,14	7,9	21
26	1	0,1	8,15	22
27	1,1	0,11	8,25	23
28	1,2	0,12	8,35	24
29	1,3	0,13	8,45	25
30	1,4	0,14	7,5	17

**Задача 2.** Рассчитать фактический расход воздуха через дверной проём размером 1,5x2,5м и определить положение плоскости равных давлений, если в помещении в резервуаре горит гептан. Среднеобъёмная температура внутри помещения составляет 365°С, температура окружающей среды – 20 °С, давление – нормальное.

Решение.

Фактический расход воздуха при газообмене через один проем рассчитывается по формуле (43):

$$G_{\phi} = \frac{2}{3} \mu \beta h_0 \sqrt{2 h_0 \rho_{\phi} (\rho_{\phi} - \rho_{n.z.})}$$

Коэффициент сопротивления проема  $\mu=0,65$ . Плотность продуктов горения:

$$\rho_{n.z.} = \frac{352}{T_n} = 0,511 \text{ кг / м}^3$$

Высоту плоскости равных давлений находим по формуле (45):

$$h_0 = \frac{2,5}{1 + \sqrt[3]{\frac{365 + 273}{20 + 273}}} = 1,09 \text{ м}$$

Подставляем найденные величины в формулу (43).

$$G_6^{\phi} = \frac{2}{3} \mu B h_0 \sqrt{2 g h_0 \rho_6 (\rho_6 - \rho_{н.с.})} = \frac{2}{3} * 0,65 * 1,5 * 1,09 * \sqrt{2 * 9,8 * 1,09 * 1,2 (1,2 - 0,511)} = 2,09 \text{ кг / с}$$

Таблица 16

Данные для расчета

№ варианта	Размерность дверного проёма	Среднеобъёмная температура внутри помещения, °С	Температура окружающей среды, °С
1	1,5x2,5	365	15
2	1,65x2,5	350	16
3	1,7x2,5	345	17
4	1,75x2,5	340	18
5	1,8x2,5	335	19
6	1,85x2,5	330	20
7	1,9x2,5	325	21
8	1,95x2,5	320	22
9	2x2,5	315	23
10	2,05x2,5	310	24
11	2,1x2,5	305	25
12	2,15x2,5	300	21
13	2,2x2,5	325	22
14	2,25x2,5	310	23
15	2,3x2,5	315	21
16	2,35x2,5	320	20
17	2,4x2,5	325	19
18	2,45x2,5	330	18
19	2,5x2,5	335	17
20	1,5x2,5	340	16
21	1,7x2,5	330	21
22	1,75x2,5	325	22
23	1,8x2,5	320	23
24	1,85x2,5	315	21
25	1,9x2,5	310	20
26	1,95x2,5	305	19
27	2x2,5	300	18
28	2,05x2,5	325	17
29	2,1x2,5	310	16
30	1,7x2,5	315	21

**Задача 3.** Определить площадь пожара  $S_{п}$  в помещении, при которой среднеобъёмная концентрация кислорода в продуктах горения достигнет 16%. Фактический расход поступающего воздуха  $G_{в}$  составляет 1,6 кг/с, удельная

массовая скорость выгорания  $v_{м}^{уд}$  равна 0,06 кг/(м<sup>2</sup>с), теоретический объём воздуха  $V_{в}^0 - 4,2$  м<sup>3</sup>/кг, плотность воздуха  $\rho_{в} - 1,2$  кг/м<sup>3</sup>.

**Решение.**

Концентрация кислорода в продуктах горения  $\varphi_{O_2}$  определяет коэффициент избытка воздуха  $\alpha$ . При наличии газообмена помещения с окружающей средой:

$$\alpha = \frac{G_{\phi}^{\phi}}{G_{\phi}^0},$$

Требуемый расход воздуха  $G_{в}^0$  рассчитывается по формуле (42):

$$G_{\phi}^0 = v_{м}^{уд} * S_n * V_{\phi}^0 * \rho_{\phi}$$

Откуда формула расчета площади пожара приобретает вид:

$$S_n = \frac{G_{\phi}^{\phi}}{\alpha * v_{м}^{уд} * V_{\phi}^0 * \rho_{\phi}}.$$

Коэффициент избытка воздуха связан с концентрацией кислорода формулой:

$$\alpha = \frac{21}{21 - \varphi_{O_2}} = \frac{21}{21 - 16} = 4,2$$

Тогда площадь пожара, при которой  $\varphi_{O_2} = 16\%$  равна:

$$S_n = 1,6 / (4,2 * 0,06 * 4,2 * 1,2) = 1,26 \text{ м}^2$$

Таблица 17

Данные для расчета

№ варианта	среднеобъёмная концентрация кислорода в продуктах горения, %	$G_{\phi}^{\phi}$ , кг/с	$v_{м}^{уд}$ , кг/(м <sup>2</sup> с)	$V_{в}^0$ , м <sup>3</sup> /кг
1	14	1,45	0,06	3,9
2	14,5	1,5	0,055	4
3	15	1,55	0,064	4,1
4	15,5	1,6	0,063	4,2
5	16	1,65	0,062	4,3
6	16,5	1,7	0,069	4,4
7	17	1,75	0,067	4,5
8	17,5	1,8	0,066	4,6
9	18	1,85	0,064	4,7
10	18,5	1,9	0,071	4,8
11	19	2	0,072	4,9
12	19,5	2,1	0,073	5

13	20	1,45	0,074	5,1
14	20,5	1,5	0,075	4,5
15	21	1,55	0,076	3,9
16	21,5	1,6	0,077	4
17	22	1,65	0,078	4,1
18	22,5	1,7	0,079	4,2
19	23	1,75	0,08	4,3
20	23,5	1,8	0,081	4,4
21	14	1,9	0,06	3,9
22	14,5	2	0,055	4
23	15	2,1	0,064	4,1
24	15,5	1,45	0,063	4,2
25	16	1,5	0,062	4,3
26	16,5	1,55	0,069	4,4
27	17	1,6	0,067	4,5
28	17,5	1,65	0,066	4,6
29	18	1,7	0,064	4,7
30	18,5	1,75	0,071	4,8



## Тема № 7. Открытые пожары

К открытым пожарам относятся природные пожары, пожары газовых и нефтяных фонтанов, складов древесины, горючих жидкостей в резервуарах, пожары на технологических установках объектов газовой, нефтяной, химической промышленности и т. п.

### **1. Пожары газовых, газонефтяных и нефтяных фонтанов**

Пожары фонтанов условно разделяют на три группы: газовые, газонефтяные и нефтяные.

Газовыми считаются фонтаны с содержанием горючего газа не менее 95% по массе.

Газонефтяными считаются фонтаны с содержанием газа более 50% и нефти менее 50% по массе.

К нефтяным относятся фонтаны с содержанием нефти более 50% по массе.

Кроме того, газовые и газонефтяные фонтаны условно подразделяются по мощности (дебиту):

- слабые – с дебитом газа до 2 млн м<sup>3</sup>/сутки;
- средние – от 2 до 5 млн м<sup>3</sup>/сутки;
- мощные – свыше 5 млн м<sup>3</sup>/сутки.

**Дебит** – расход газа при пожаре (млн м<sup>3</sup>/сутки).

**2. Горение жидкости в резервуаре** представляет собой горение паровоздушной смеси, образующейся над зеркалом горючей жидкости. Горят пары жидкости, а не сама жидкость. Количество паров зависит от скорости испарения. Испарение – переход жидкости в пар со свободной поверхности при температуре ниже точки кипения.

При горении жидкостей в резервуарах коэффициент поверхности горения равен  $K_{\text{п}} = 1$ .

Характер, форма и размеры пламени определяются в основном видом горючей жидкости (ГЖ), ее температурой и размерами сосуда.

Пламя горючих жидкостей в резервуарах является диффузным, т. е. процесс перемешивания горючего и окислителя происходит непосредственно в зоне горения. Для небольших сосудов характерны ламинарные режимы горения. С увеличением объемов сосудов режим горения переходит в турбулентный.

Скорость выгорания жидкости при пожарах в резервуарах зависит от следующих факторов:

- природа жидкости (плотность, температура воспламенения и др.);
- начальная температура жидкости: с увеличением начальной температуры жидкости скорость выгорания увеличивается, поскольку снижаются затраты тепла на прогрев жидкости до температуры кипения;
- диаметр резервуара, влияющий на характер подвода тепла от зоны пламени к жидкости;
- уровень жидкости в резервуаре: с его увеличением массовая скорость выгорания увеличивается, так как облегчается доступ воздуха;
- влажность жидкости: содержание влаги понижает скорость выгорания жидкости вследствие дополнительных затрат на ее испарение в зоне горения;
- содержание кислорода в атмосфере: большинство жидкостей не способны к горению в атмосфере с содержанием кислорода менее 15%; с повышением концентрации кислорода выше этого предела скорость выгорания возрастает.

### ***3. Пожары на складах лесоматериалов***

Как и все открытые пожары, пожары на складах лесоматериалов характеризуются отсутствием ограничений для газообмена и своеобразием параметров зон горения.

Особенностью таких пожаров является большая скорость их распространения, которая связана со скоростью ветра и разлетом искр и головней вследствие образования аэродинамического вихря в зоне горения. Также особенностью пожаров на складах лесоматериалов является большой объем зоны горения, который связан с большим объемом нагретых продуктов

горения и свежего воздуха. Аэродинамические потоки способствуют созданию все новых очагов пожаров, часто на большом расстоянии от основной зоны горения.

Пожары на складах лесоматериалов характеризуются высокими скоростями выгорания.

Скорость распространения огня зависит:

- от размеров материалов и изделий,
- влажности материалов и изделий.

Время и скорость распространения пламени определяются временем прогрева поверхностного слоя материала до температуры воспламенения. Таким образом, уменьшение линейных размеров пожарной нагрузки приводит к увеличению скорости распространения пламени. Наоборот, увеличение линейных размеров пожарной нагрузки приводит к возрастанию времени прогрева поверхностного слоя до температуры воспламенения и к уменьшению скорости распространения пламени.

### ***Задания для самостоятельного решения***

**Задача 1.** На сколько опустится уровень мазута за  $A$  мин горения в резервуаре. Плотность мазута составляет  $B$  кг/м<sup>3</sup>, удельная массовая скорость выгорания равна  $C$  кг/(м<sup>2</sup>·с).

#### **Решение**

Обозначим: изменение уровня жидкости –  $h$ , время горения –  $\tau$ , удельную массовую скорость выгорания –  $v_m^{уд}$ , плотность жидкости –  $\rho$ . В примере время горения 28 минут, плотность жидкости 940 кг/м<sup>3</sup>, удельная массовая скорость выгорания 0,035 кг/(м<sup>2</sup>·с).

Объем выгоревшей жидкости  $V$  равен произведению площади зеркала жидкости  $S$  на  $\Delta h$ .

$$V = S * \Delta h$$

Значение  $V$  также можно выразить через массу выгоревшего вещества  $m$  и плотность  $\rho$ :

$$V = \frac{m}{\rho}$$

Тогда  $\Delta h = \frac{m}{\rho S}$

$$m = v_m^{y0} \tau S$$

$$\Delta h = \frac{v_m^{y0} \tau}{\rho} = \frac{0,035 \text{ кг} / (\text{м}^2 \cdot \text{с}) * 28 * 60 \text{ с}}{940 \text{ кг} / \text{м}^3} = 0,063 \text{ м} = 6,3 \text{ см}$$

**Таблица 18**

Данные для расчета

№ варианта	τ, мин	ρ, кг/м <sup>3</sup>	v <sub>м</sub> <sup>уд</sup> , кг/(м <sup>2</sup> ·с)
1	10	940	0,031
2	11	950	0,032
3	12	960	0,033
4	13	970	0,034
5	14	980	0,035
6	15	990	0,036
7	16	1000	0,037
8	17	1010	0,038
9	18	1020	0,039
10	19	1030	0,041
11	20	1040	0,042
12	10	1050	0,043
13	11	1060	0,044
14	12	1070	0,045
15	13	1080	0,046
16	14	1090	0,035
17	15	1100	0,037
18	16	1100	0,039
19	17	1120	0,034
20	18	1130	0,035
21	15	1040	0,034
22	16	1050	0,035
23	17	1060	0,036
24	18	1070	0,037
25	19	1080	0,038
26	20	1090	0,039
27	10	1100	0,034
28	11	1100	0,035
29	12	1120	0,036
30	15	1130	0,037

**Задача 2.** За какое время горения уровень жидкости в резервуаре опустится на 3, 4 см, если удельная массовая скорость выгорания горючей жидкости равна  $0,02 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ , плотность жидкости  $850 \text{ кг}/\text{м}^3$ ?

**Решение**

Обозначим: изменение уровня жидкости –  $h$ , время горения –  $\tau$ , удельную массовую скорость выгорания –  $v_m^{yd}$ , плотность жидкости –  $\rho$ .

Объем выгоревшей жидкости  $V$  равен произведению площади зеркала жидкости  $S$  на  $\Delta h$ .

$$V = S * \Delta h$$

Значение  $V$  также можно выразить через массу выгоревшего вещества  $m$  и плотность  $\rho$ :

$$V = \frac{m}{\rho}$$

$$\text{Тогда } \Delta h = \frac{m}{\rho S}$$

$$m = v_m^{yd} \tau S$$

$$\tau = \frac{\Delta h \rho}{v_m^{yd}} = \frac{0,034 \text{ м} * 850 \text{ кг} / \text{м}^3}{0,02 \text{ кг} / (\text{м}^2 \cdot \text{с})} = 1445 \text{ с} \approx 24 \text{ мин}$$

**Таблица 19**

**Данные для расчета**

№ варианта	$\Delta h$ , см	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$v_m^{yd}$ , кг/(м <sup>2</sup> ·с)
1	3,4	940	0,031
2	3,5	950	0,032
3	3,6	960	0,033
4	3,7	970	0,034
5	3,8	980	0,035
6	3,9	990	0,036
7	4	1000	0,037
8	4,1	1010	0,038
9	4,2	1020	0,039
10	4,3	1030	0,041
11	4,4	1040	0,042
12	4,5	1050	0,043
13	4,6	1060	0,044
14	4,7	1070	0,045
15	4,8	1080	0,046
16	4,9	1090	0,035

17	5	1100	0,037
18	5,1	1100	0,039
19	5,2	1120	0,034
20	5,3	1130	0,035
21	4,3	1030	0,041
22	4,4	1040	0,042
23	4,5	1050	0,043
24	4,6	1060	0,044
25	4,7	1070	0,045
26	4,8	1080	0,046
27	4,3	1030	0,041
28	4,4	1040	0,042
29	4,5	1050	0,043
30	4,6	1060	0,044

**Задача 3.** Определить теплоту пожара при горении жидкости в резервуаре, используя параметры, указанные в таблице 1.

**Решение**

Удельная массовая скорость выгорания  $v_m^{уд}$  – масса горючего вещества или материала, выгорающая в единицу времени с единицы площади пожара:

$$v_m^{уд} = \frac{v_m^{abc}}{S_n},$$

$$v_m^{уд} = \frac{m}{\tau * S_n}$$

Если выражать через изменение уровня жидкости –  $h$ , то:

$$v_m^{уд} = \frac{\rho \Delta h}{\tau}$$

$$q_n = \beta v_m^{уд} S_{II} Q_H$$

$$q_n = \beta \frac{\rho \Delta h}{\tau} S_{II} Q_H$$

Так как горение происходит по поверхности, то площадь пожара:

$$S_{II} = \pi r^2 = \frac{\pi d^2}{4}$$

$$q_n = \beta \frac{\rho \Delta h}{\tau} \frac{\pi d^2}{4} Q_H$$

$$q_n = 0,93 * \frac{790 \text{ кг} / \text{м}^3 * 0,034 \text{ м} * 3,14 * 10^2 (\text{м}^2)^2 * 31360 \text{ кДж} / \text{кг}}{600 \text{ с}} = 110204,79 \frac{\text{кДж}}{\text{с}} \approx 110205 \text{ кВт}$$

Таблица 20

Данные для расчета

№ варианта	Жидкость	Плотность $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	Диаметр резервуара $d$ , м	Нижшая теплота сгорания $Q_n$ , кДж/кг	Коэффициент полноты сгорания $\beta$	$\Delta h$ , см	$\tau$ , мин
1	Ацетон	790	10	31360	0,93	3,4	10
2	Мазут	940	8	41900	0,85	3,5	11
3	Керосин осветительные	790	12	43692	0,8	3,6	12
4	Бензин	800	5	43580	0,85	3,7	13
5	Бутиловый спирт	805	4	36200	0,93	3,8	14
6	Нефть	920	10	43600	0,85	3,9	15
7	Гептан	684	8	44919	0,90	4	16
8	Декан	734	12	44602	0,80	4,1	17
9	Изобутиловый спирт	803	5	36743	0,85	4,2	18
10	Изопропиловый спирт	784	4	34139	0,90	4,3	19
11	Метиловый спирт	787	8	23839	0,90	4,4	10
12	Октан	702	10	44787	0,80	4,5	11
13	Пентан	621	15	45350	0,85	4,6	12
14	Пропиловый спирт	801	8	34405	0,85	4,7	13
15	Этиловый спирт	785	6	30562	0,90	4,8	14
16	Дизельное топливо	790	15	43419	0,80	4,9	15
17	Уайт-спирит	780	10	43966	0,90	5	16
18	Масло трансформаторное	870	8	43550	0,87	5,1	17
19	Гексан	655	6	45105	0,83	5,2	18
20	Гексиловый спирт	826	5	39587	0,85	5,3	19

**Задача 4.** Определить уровень нижней границы гомотермического слоя  $h$  при горении нефти в резервуаре. Начальный уровень жидкости  $H = X$  м, время горения  $\tau = A$  мин. Плотность данной нефти  $\rho = 750$  кг/м<sup>3</sup>, удельная массовая

скорость выгорания  $v_{уд}^M = 0,045 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ , скорость нарастания гомотермического слоя  $v_{ГТС} = 7 \cdot 10^{-4} \text{ м}/\text{с}$ .

### Решение

Глубина, на которую опустится нижняя граница гомотермического слоя за время горения, складывается из толщины выгоревшего слоя нефти  $\Delta H$ , м, и толщины самого слоя  $\delta_{ГТС}$ , м. Тогда

$$h = H - (\Delta H + \delta_{ГТС})$$

$$\Delta H = \tau * u_{л}$$

$$\delta_{ГТС} = \tau * v_{ГТС}$$

Линейная скорость выгорания

$$v_{л} = \frac{v_{уд}^M}{\rho} = \frac{0,045 \text{ кг} / \text{м}^2 * \text{с}}{750 \text{ кг} / \text{м}^3} = 6 * 10^{-5} \text{ м} / \text{с}$$

Получаем

$$h = H - \tau (v_{л} + v_{ГТС})$$

$$h = 10 \text{ м} - 40 * 60 * (6 * 10^{-5} + 7 * 10^{-4}) \text{ м} = 8,176 \text{ м}$$

Таблица 21

Данные для расчета

№ варианта	H, м	τ, мин
1	11	40
2	12	41
3	13	42
4	14	43
5	15	44
6	16	45
7	17	46
8	18	47
9	19	48
10	20	49
11	21	50
12	22	51



13	23	52
14	24	53
15	25	54
16	26	55
17	27	56
18	28	57
19	29	58
20	30	59

## Тема № 8. Внутренние пожары

Для сравнения, описания, исследования пожаров используют ряд общих определений и понятий, названных *параметрами пожара*. Приведем основные из них.

*Площадь пожара*,  $F_{п}$  ( $m^2$ ). Площадью пожара называется площадь проекции зоны горения на горизонтальную или вертикальную плоскость. На рис. 1 показаны характерные случаи определения площади пожара.

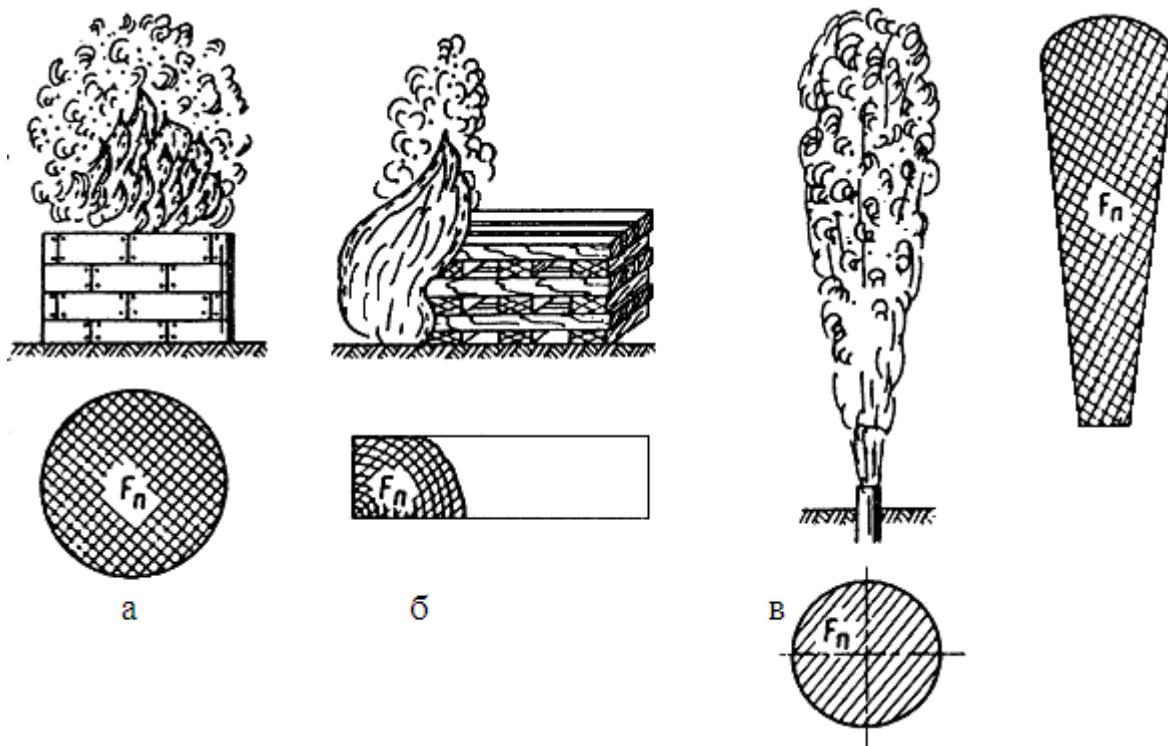


Рисунок 3- Площадь пожара: а – при горении жидкости в резервуаре;

б – при горении штабеля пиломатериалов;

в – при горении газонефтяного фонтана

*Продолжительность пожара*,  $\tau_{п}$ , мин (час) – время с момента его возникновения до полного прекращения горения.

*Температура пожара* –  $t_{п}$ , °C, либо  $T_{п}$ , K. Для открытых пожаров за температуру пожара принимают температуру пламени.

Для внутренних пожаров за температуру пожара принимают среднеобъемную температуру газовой среды в помещении.

Величина удельной горючей нагрузки,  $P_{п.н.}$ , кг/м<sup>2</sup> – это масса всех горючих и трудногорючих материалов, приходящихся на 1 м<sup>2</sup> площади их размещения (пола помещения или открытой площадки):

$$P_{п.н.} = \frac{\sum_i M_i}{F}, \quad (51)$$

где  $\sum M_i$  – общая масса всех горючих и трудногорючих материалов, кг;  $F$  – площадь пола помещения или открытой площадки, м<sup>2</sup>.

Для оценки степени пожарной опасности объектов производственного и складского назначения иногда используют понятие *удельная пожарная нагрузка*,  $g$ , МДж/м<sup>2</sup>, включающего в себя низшую теплоту сгорания всех веществ:

$$g = \frac{\sum_i M_i \cdot Q_{сi}^н}{F}. \quad (52)$$

где  $Q_{сi}^н$  – низшая теплота сгорания  $i$ -го горючего вещества, кДж/кг.

*Площадь поверхности горения* –  $F_{пг}$ , м<sup>2</sup>. Этот параметр характеризует реальную площадь поверхности горючего, которая участвует в горении.

*Коэффициент поверхности горения*,  $K_{пг}$  – отношение площади поверхности горения  $F_{пг}$  к площади пожара  $F_{п}$

$$K_{пг} = \frac{F_{пг}}{F_{п}}. \quad (53)$$

*Линейная скорость распространения пожара*,  $v_{л}$ , м/с – расстояние, которое проходит фронт пламени в единицу времени по поверхности горючего материала.

*Массовая скорость выгорания*,  $v_{м}$ , кг/с – масса пожарной нагрузки, выгоревшей в единицу времени. По физическому смыслу для твердых и жидких веществ этот параметр представляет собой скорость газификации горючего, т. е. какая масса горючего переходит в газообразное состояние в

единицу времени. Чем больше площадь поверхности горючего вещества, тем интенсивнее газификация.

*Приведенная массовая скорость выгорания*  $v'_m$ , кг/(с·м<sup>2</sup>), кг/(мин·м<sup>2</sup>) – масса пожарной нагрузки, выгоревшей в единицу времени с единицы площади пожара

$$v'_m{}^{привед.} = v'_m{}^{abc} / F_{п.г.} \quad (54)$$

*Удельная массовая скорость выгорания*,  $\bar{v}_m$ , кг/(с·м<sup>2</sup>), кг/(мин·м<sup>2</sup>) – масса выгоревшей пожарной нагрузки в единицу времени на единицу площади поверхности горения

$$v'_m{}^{уд} = v'_m{}^{abc} / F_n \quad (55)$$

*Объемная скорость выгорания*,  $v_{об}$ , м<sup>3</sup>/(м<sup>2</sup>·с) – объем пожарной нагрузки, выгорающей в единицу времени с единицы площади. Для газов – это объем газа, сгоревший в единицу времени. Для жидкости объемную скорость выгорания используют для численного выражения скорости понижения уровня жидкости в резервуаре по мере ее выгорания, а для твердых веществ – уменьшения толщины слоя твердого горючего материала во времени (м/с).

*Теплота пожара* –  $q_n$ , кВт – количество энергии в виде теплоты, выделяющееся при пожаре в единицу времени

$$q_n = \beta v_m Q_c^H, \quad (56)$$

где  $\beta$  – коэффициент полноты сгорания;  $v_m$  – массовая скорость выгорания, кг/с;  $Q_c^H$  – низшая теплота сгорания материала, кДж/кг.

*Коэффициент избытка воздуха при пожаре*,  $\alpha$  – отношение массового количества фактически затрачиваемого воздуха на сгорание пожарной нагрузки ( $m^{\phi}_B$ ) к теоретически необходимому количеству ( $m^T_B$ ).

$$\alpha = \frac{m^{\phi}_B}{m^T_B} \quad (57)$$

*Интенсивность или плотность задымления*,  $x$ , г/м<sup>3</sup> – параметр, характеризующий массовое содержание частиц дыма, находящихся в единице

объема газовой среды либо численно оценивается по толщине слоя дыма, через который не виден свет эталонной лампы силой 21 кандела (~30 Вт).

*Облученность объектов* – интенсивность теплового потока от пламенного источника, приходящаяся на единицу площади облучаемой поверхности. В безветренную погоду в зависимости от расстояния до объекта определяется из формулы:

$$E = \frac{\eta_{л} * q_{н}}{4\pi * R^2}, \text{ Вт / м}^2 \quad (58)$$

где  $\eta_{л}$  – доля теплоты, рассеиваемая в окружающее пространство излучением;  $R$  – расстояние от центра факела до точки измерения.

Так, факел фонтана является мощным источником теплового излучения, что является одним из серьезных препятствий при борьбе с пожаром фонтана.

### *Задания для самостоятельного решения*

**Задача 1.** Рассчитать приведенную массовую скорость выгорания штабеля, сложенного из деревянных брусьев, если за  $A$  мин пожара его масса уменьшилась на  $B$  %. Штабель состоит из пяти рядов, в каждом ряду размещаются десять брусьев. Размеры бруса –  $0,1 \times 0,1 \times X$  м. Плотность древесины  $\rho$  составляет  $B$  кг/м<sup>3</sup>. Определить коэффициент поверхности данного штабеля. В примере продолжительность пожара  $A$  – 15 минут, масса бруса уменьшилась на  $B$  – 15 %, длина бруса  $X$  – 2 м, плотность древесины  $B$  – 450 кг/м<sup>3</sup>.

#### **Решение**

Приведенная массовая скорость выгорания рассчитывается по формуле:

$$v_M^{пр} = \frac{V_M^{abc}}{S_{шт}}$$

Изменение массы штабеля за время горения определим по формуле

$$\Delta m = \eta \rho V k n,$$

где  $\eta$  – доля выгоревшей массы штабеля;

$V$  – объем одного бруса, м<sup>3</sup>;

к-количество брусьев в одном ряду;

п-количество рядов в штабеле.

Подставив численные значения, получим:

$$\Delta m = 0,15 * 450 \text{ кг} / \text{м}^3 * 0,1 \text{ м}^3 * 2 * 10 * 5 = 67,5 \text{ кг}$$

В штабеле имеются скрытые и открытые поверхности

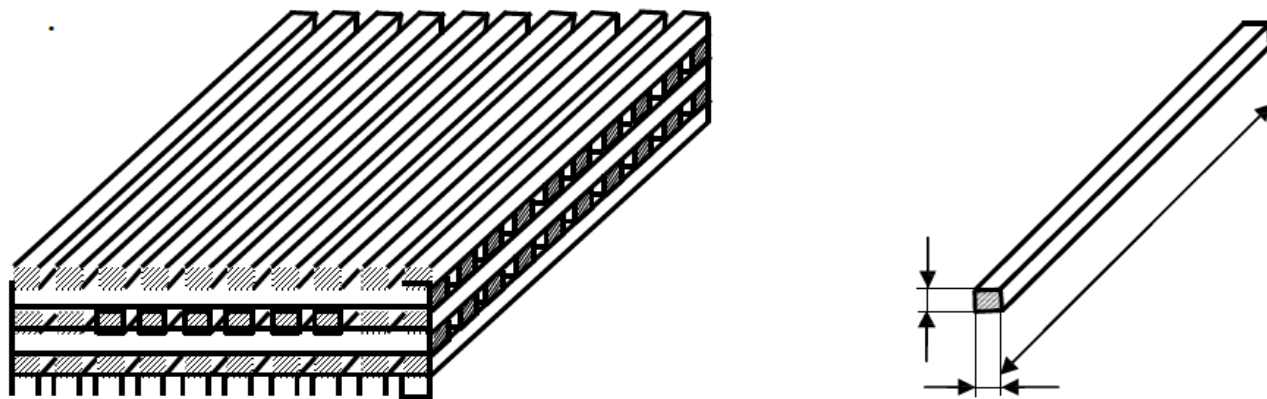


Рисунок 4-Схема укладки штабеля

Скрытая поверхность штабеля состоит из граней брусьев, находящихся в нижнем ряду и соприкасающихся с поверхностью земли, а также участков брусьев, соприкасающихся друг с другом. Суммарную площадь скрытой поверхности  $S_{\text{скр}}$  находим по формуле

$$S_{\text{скр}} = 2alk + 2a^2k^2(n-1),$$

где к-количество брусьев в ряду;

п-количество рядов.

Открытая поверхность (поверхность горения  $S_{\text{ПГ}}$ ) рассчитывается как разность общей поверхности всех брусьев  $S_{\text{общ}}$  и скрытой поверхности брусьев в штабеле

$$S_{\text{ПГ}} = S_{\text{откр}} = S_{\text{общ}} - S_{\text{скр}}$$

Общая поверхность штабеля – это сумма площадей всех граней одного бруса, умноженная на количество всех брусьев в штабеле  $kn$ :

$$S_{\text{общ}} = (2a^2 + 4al)kn = (2 * 0,1^2 + 4 * 0,1 * 2) * 10 * 5 = 41 \text{ м}^2$$

Площадь скрытой поверхности штабеля

$$S_{\text{скр}} = 2 * 0,1 * 2 * 10 + 2 * 0,1^2 * 10^2 * (5-1) = 12 \text{ м}^2$$

Площадь поверхности горения штабеля

$$S_{III} = 41\text{м}^2 - 12\text{м}^2 = 29\text{м}^2$$

Приведенная массовая скорость выгорания

$$v_M^{прив} = 67,5\text{кг} / (29\text{м}^2 * 15 * 60\text{с}) = 2,586 * 10^{-3} \frac{\text{кг}}{\text{м}^2 * \text{с}}$$

Площадь пожара составляет

$$S_n = l^2 = 4\text{м}^2$$

Коэффициент поверхности горения штабеля определяем по формуле

$$K_{II} = \frac{S_{III}}{S_n} = 29/4 = 7,25$$

Таблица 22

Данные для расчетов

№ варианта	τ, мин	Δm, %	ρ, кг/м <sup>3</sup>	X, м
1	14	15	450	1,8
2	14,5	16	460	1,9
3	15	17	470	2
4	15,5	18	480	2,1
5	16	19	490	2,2
6	16,5	20	500	2,3
7	17	21	450	2,4
8	17,5	22	460	2,5
9	18	23	470	2,6
10	18,5	24	480	1,8
11	19	15	490	1,9
12	19,5	16	500	2
13	20	17	510	2,1
14	20,5	18	520	2,2
15	21	19	530	2,3
16	21,5	20	540	2,4
17	22	21	550	2,5
18	22,5	22	560	2,6
19	23	23	570	1,8
20	23,5	24	580	1,9
21	15,5	25	500	2
22	16	26	510	2,1
23	16,5	27	520	2,2
24	17	28	530	2,3
25	17,5	29	540	2,4
26	17,5	30	550	2,5
27	18	20	500	2,6
28	18,5	21	510	1,8
29	19	22	520	1,9

30	19,5	23	530	2
----	------	----	-----	---

**Задача 2.** Определить величину удельной горючей и удельной пожарной нагрузки в помещении площадью  $A \text{ м}^2$ . Пол в помещении выложен деревянным паркетом толщиной  $h = 2 \text{ см}$ . Плотность древесины  $\rho$ , из которой изготовлен паркет, составляет  $B \text{ кг/м}^3$ . В помещении имеется следующая мебель: деревянные шкаф массой  $B \text{ кг}$ ; стол –  $30 \text{ кг}$ ; два стула по  $7 \text{ кг}$  каждый; диван массой  $95 \text{ кг}$ , состоящий из  $70 \%$  древесины,  $20 \%$  пенополиуретана и  $10 \%$  кожи. Низшая теплота сгорания древесины составляет  $16,5 \text{ МДж/кг}$ , пенополиуретана –  $24,52$ , кожи –  $21,52 \text{ МДж/кг}$ .

**Решение:**

Расчет горючей и удельной пожарной нагрузки проводится по формулам

$$\rho_{nn} = \sum \frac{m_i}{S_{\text{пола}}}$$

$$g_{nn} = \sum \frac{m_i Q_{Hi}}{S_{\text{пола}}}$$

Масса всех горючих материалов складывается из массы паркета, шкафа, стульев и массы горючих материалов, из которых собрана мебель.

Масса паркета определяется по формуле

$$m_{\text{пар}} = \rho V$$

$$V = S_{\text{П}} * h = 12 * 0,02 \text{ м}^3 = 0,24 \text{ м}^3$$

Следовательно,

$$m_{\text{пар}} = 0,24 * 450 \text{ кг} = 108 \text{ кг}$$

Масса древесины, пенополиуретана (ППУ) и кожи, из которых сделан диван, соответственно равны:

$$m_{\text{древ}} = 0,7 * 95 \text{ кг} = 66,5 \text{ кг}$$

$$m_{\text{пу}} = 0,2 * 95 \text{ кг} = 19 \text{ кг}$$

$$m_{\text{кожи}} = 0,1 * 95 \text{ кг} = 9,5 \text{ кг}$$

Удельная горючая нагрузка



$$\rho_{ин} = (108 + 80 + 30 + 2 * 7 + 66,5 + 19 + 9,5) \text{ кг} / 12 \text{ м}^2 = 27,25 \text{ кг} / \text{ м}^2$$

Удельная пожарная нагрузка

$$\rho_{ин} = (108 + 80 + 30 + 2 * 7 + 66,5) * 16,5 + 19 * 24,52 + 9,5 * 21,52) \text{ МДж} / 12 \text{ м}^2 = 466,26 \text{ МДж} / \text{ м}^2$$

Таблица 23

Данные для расчетов

№ варианта	S, м <sup>2</sup>	ρ, кг/м <sup>3</sup>	m, кг
1	10	450	60
2	11	460	65
3	12	470	70
4	13	480	75
5	14	490	80
6	15	500	85
7	16	450	90
8	17	460	60
9	18	470	65
10	19	480	70
11	10	490	75
12	11	500	80
13	12	510	85
14	13	520	90
15	14	530	60
16	15	540	65
17	16	550	70
18	17	560	75
19	18	570	80
20	10	580	85
21	10	490	60
22	11	500	65
23	12	510	70

24	13	520	75
25	14	530	80
26	15	540	85
27	16	550	90
28	17	560	60
29	18	570	65
30	19	580	70

## 2.3. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРЕКРАЩЕНИЯ ГОРЕНИЯ

### Тема № 9. Тепловая теория прекращения горения

Согласно тепловой теории потухания, прекращение пламенного горения наступает в результате понижения температуры пламени до некоторого критического значения, называемого температурой потухания  $T_{\text{пот}}$ . При тушении пожаров, как правило, это достигается применением различных огнетушащих веществ.

При этом одни огнетушащие вещества воздействуют главным образом на процессы, протекающие непосредственно в объеме зоны горения и практически не затрагивают поверхность конденсированного горючего. Это вещества, применяемые в газо-, парообразном или аэрозольном состоянии: нейтральные газы, химически активные ингибиторы, аэрозоли и т.д. Другие оказывают косвенное воздействие на процессы, протекающие в газовой фазе. С их помощью уменьшают выход горючих газов путем охлаждения поверхности горючего или ее изолирования от зоны горения (пены, порошки).

Кроме того, некоторые огнетушащие вещества способны работать одновременно в газовой фазе и на поверхности горючего. Например, распыленная вода в зависимости от размера капель может: полностью испаряться в пламени, оказывая объемное действие только на зону горения; частично испаряться в пламени, оказывая и объемное и поверхностное действие; практически не взаимодействовать с пламенем, оказывая чисто поверхностное действие.

Поэтому, на практике применяются два основных способа подачи огнетушащих веществ – *в объем зоны горения («тушение по объему»)* и *на поверхность горючего («тушение по поверхности»)*.

*При объемном тушении* огнетушащее вещество может подаваться локально, т.е. непосредственно в зону горения – над локальным очагом пожара, в факел газового фонтана, или в объем помещения – тушение методом

затопления. В обоих случаях горение прекращается, когда концентрация подаваемого вещества становится равной огнетушащей и температура пламени снижается до температуры потухания.

*При тушении по поверхности* температура пламени достигает температуры потухания и горение прекращается, когда массовая скорость выгорания падает ниже предельного значения, при котором концентрация горючих газов или паров над поверхностью становится меньше нижнего концентрационного предела распространения пламени (НКПР). В целом, процесс тушения для всех видов горючих веществ и материалов характеризуется **следующими параметрами:**

**1.Время тушения  $\tau_t$**  – время от начала подачи огнетушащего вещества до момента прекращения горения (в секундах или минутах).

**2.Интенсивность подачи  $J$**  – количество огнетушащего вещества, подаваемое на  $1\text{ м}^2$  площади пожара в секунду ( $\frac{\text{л}}{\text{м}^2 * \text{с}}$ ).

**3.Удельный расход  $q_{уд}$**  – количество огнетушащего вещества (л, кг), израсходованное за время тушения в расчете либо на  $1\text{ м}^2$  площади пожара, либо на  $1\text{ м}^3$  объема помещения или на  $1\text{ м}^3$  фонтанирующего газа ( $\frac{\text{л}}{\text{м}^2}, \frac{\text{л}}{\text{м}^3}$ ).

Время тушения и затраты огнетушащего вещества зависят от интенсивности подачи. Характерные графики зависимости времени тушения и удельного расхода от интенсивности подачи показаны на рисунке 5.

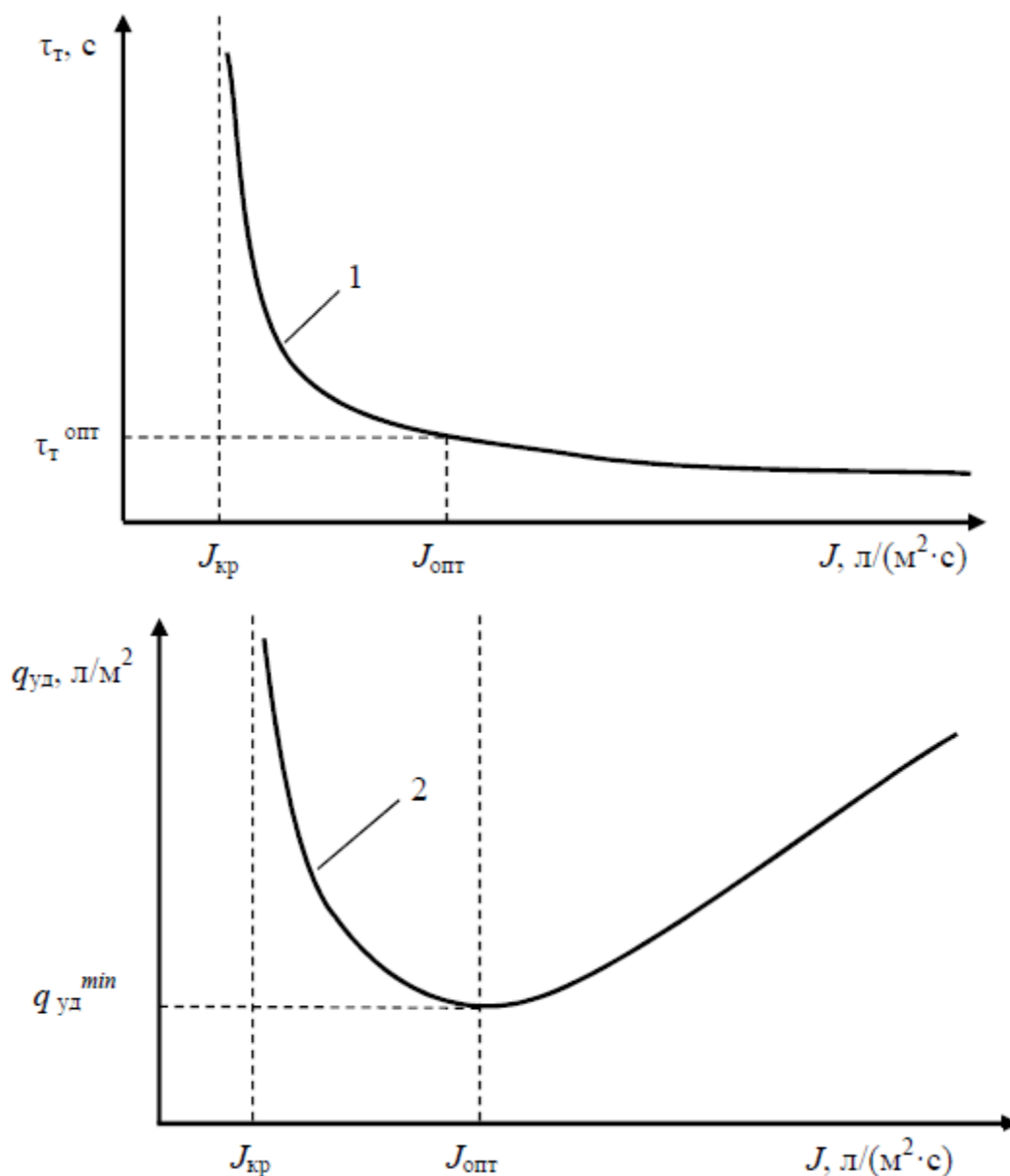


Рисунок 5 - Зависимость времени тушения (1) и удельного расхода (2) от интенсивности подачи огнетушащего вещества

Время тушения зависит от соотношения фактической и критической интенсивностей подачи. Если фактическая интенсивность подачи огнетушащего вещества оказывается равной критической, тушение не достигается и  $\tau_T \rightarrow \infty$ . При тушении пенами *критической* является *интенсивность подачи*, равная интенсивности разрушения пены; при тушении газовыми составами и аэрозолями – интенсивность утечки огнетушащего вещества из заполняемого объёма помещения; при тушении водой по поверхности – интенсивность подачи, компенсирующая лучистый тепловой

поток к горячей поверхности от собственного пламени и внешних источников излучения.

*Интенсивность подачи, при которой удельный расход огнетушащего вещества минимален, считается оптимальной  $J_{opt}$ .*

Эффективность применяемого огнетушащего вещества и способа подачи можно оценить с помощью показателя эффективности тушения  $\Pi_{эт}$  и коэффициента использования  $K_{и}$ .

Выбор огнетушащих веществ и способов их подачи зависит от того, какие условия необходимы и достаточны для прекращения горения данного вида горючего вещества, в данных условиях пожара.

### ***Прекращение горения газов (газовых фонтанов)***

Для прекращения горения газов необходимо и достаточно отобрать непосредственно от зоны горения такое количество теплоты, чтобы температура факела понизилась до температуры потухания. Охлаждать исходное горючее или окислитель, в данном случае, бесполезно, т.к. газы воспламеняются и горят при любой реально достижимой температуре. При этом механизмы отбора тепла в объеме пламени зависят от применяемого огнетушащего вещества.

За температуру потухания принимается адиабатическая температура горения предельно обедненной газовой смеси – смеси на НКПР.

Подавать огнетушащие вещества в зону горения можно различными техническими средствами как извне, так и вместе с потоком горючего или окислителя. Например, на тушение газового фонтана воду можно подавать извне лафетными стволами, автомобилями газодляного тушения, а также закачкой внутрь фонтанирующей скважины. Наиболее эффективным способом тушения пламени газового фонтана является импульсная (залповая) подача огнетушащего порошка в объем зоны горения.

## *Прекращение горения жидкостей*

Необходимым условием для тушения жидкости также является прекращение горения в газовой фазе. Если удастся создать условия, требуемые для потухания пламени во всем объеме зоны горения одновременно, то, при отсутствии внешних источников зажигания и температуре окружающей среды ниже температуры самовоспламенения, этого будет также и достаточно для тушения пожара. Это достигается подачей огнетушащих веществ объемного или объемно-поверхностного действия (газовых или порошковых составов) различными техническими средствами либо непосредственно в зону горения, либо в объем помещения (газовых или аэрозолеобразующих составов).

Вместе с тем, прекратить горение жидкости можно уменьшая скорость испарения путем отвода тепла не от пламени, а от поверхностного слоя. По мере уменьшения концентрации горючего в зоне горения температура пламени понижается. Если температуру поверхности понизить до температуры вспышки, концентрация горючего над поверхностью упадет до нижнего концентрационного предела, температура пламени достигнет температуры потухания и горение прекратится.

Условием *необходимым и достаточным* для тушения жидкости охлаждением поверхности является понижение ее температуры от температуры кипения до температуры вспышки. Физически это означает, что массовую скорость выгорания надо уменьшить до такого минимального значения, при котором концентрация пара над поверхностью не превышает нижний концентрационный предел распространения пламени. Для этого интенсивность теплоотвода должна быть не ниже интенсивности теплового потока, затрачиваемого в единицу времени на образование горючей концентрации пара над поверхностью жидкости и формирование прогретого слоя. Для жидкостей данное условие описывается следующим уравнением:

$$q_{отс}^{преб} = [c(T_{кин} - T_{всп}) + r] v_m^{y0} + Q_{зан} / \tau_T, \text{кВт} / \text{м}^2, \quad (59)$$

где  $c$  – удельная теплоемкость жидкости, кДж/(кг·К);  $T_{\text{кип}}$  и  $T_{\text{всп}}$  – температура кипения и вспышки соответственно, °С;  $r$  – удельная теплота парообразования, кДж/кг;  $v_{\text{м}}^{\text{уд}}$  – удельная массовая скорость выгорания, кг/(м<sup>2</sup>·с);  $Q_{\text{зап}}$  – количество тепла, аккумулируемое в прогретом слое, кДж/м<sup>2</sup>;  $\tau_{\text{т}}$  – время тушения, с.

Тепло, аккумулируемое прогретым слоем жидкости, находится по формуле:

$$Q_{\text{зап}} = \frac{\lambda \rho}{v_{\text{м}}^{\text{уд}}} (T_{\text{кип}} - T_{\text{всп}}), \text{ кДж} / \text{м}^2 \quad (60)$$

где  $\lambda$  – теплопроводность жидкости, кВт/(м·К);  $\rho$  – плотность жидкости, кг/м<sup>3</sup>;  $v_{\text{м}}^{\text{уд}}$  – удельная массовая скорость выгорания, кг/(м<sup>2</sup>·с).

Если огнетушащее вещество подается с интенсивностью  $J$ , поступает на поверхность прогретого слоя без потерь и полностью реализует свою

охлаждающую способность  $Q_{\text{охл}}$ , то интенсивность теплоотвода будет равна  $J \cdot Q$ . Из уравнения (1) получаем теоретическое время тушения жидкости охлаждением прогретого слоя:

$$\tau_{\text{т}} = \frac{Q_{\text{зап}}}{J Q_{\text{охл}} - [c(T_{\text{кип}} - T_{\text{всп}}) + r] v_{\text{м}}^{\text{уд}}}, \text{ с}, \quad (61)$$

где  $Q_{\text{охл}}$  – охлаждающий эффект огнетушащего вещества, кДж/л или кДж/кг.

Охлаждающий эффект огнетушащего вещества – это максимальное количество тепла, которое может быть отведено единицей объема или массы огнетушащего вещества от 1 м<sup>2</sup> поверхности горения или 1 м<sup>3</sup> объема зоны горения.

Критическая интенсивность подачи огнетушащего вещества при таком способе тушения жидкости равна:

$$J_{\text{кр}} = \frac{[c(T_{\text{кип}} - T_{\text{всп}}) + r] v_{\text{м}}^{\text{уд}}}{Q_{\text{охл}}}, \text{ л} / (\text{с} \cdot \text{м}^2) \quad (62)$$



Выбор конкретного огнетушащего вещества зависит от его способности выполнить все условия необходимые и достаточные для прекращения горения. Например, очевидно, что охладить гептан водой до температуры вспышки  $-4^{\circ}\text{C}$  физически не возможно. Для этой цели, в данном случае, подходят жидкий азот, твердая гранулированная углекислота или другие огнетушащие вещества с температурой кипения ниже  $-4^{\circ}\text{C}$ . Если по каким-то причинам они не доступны, следует изолировать зону горения от поверхности жидкости слоем пены. При этом сначала уменьшается скорость испарения, что приводит к понижению температуры пламени до температуры потухания вследствие уменьшения концентрации горючего в зоне химических реакций. Затем выход пара прекращается и, пока слой пены или порошка сохраняет изолирующую способность, повторное воспламенение жидкости становится невозможным.

### ***Прекращение горения твердых горючих материалов (ТГМ)***

Гомогенное (пламенное) горение ТГМ обусловлено образованием горючих газов в результате термического разложения вещества – пиролиза.

Для гомогенного горения необходимо, чтобы скорость выделения газообразных продуктов пиролиза и приток воздуха были достаточны для образования над поверхностью материала горючей смеси, т.е. смеси, в которой концентрация горючего газа не ниже НКПР. Непрерывное поступление горючих паров и газов в зону горения поддерживается интенсивным тепловым потоком к поверхности ТГМ от собственного пламени и внешних источников.

Пиролиз некоторых ТГМ начинается после плавления и протекает в тонком поверхностном слое. Как правило, это линейные несшитые полимеры (полиметилметакрилат, полиэтилен, полистирол и другие термопласты). Такие материалы, подобно жидкости, выгорают без остатка. Удельное количество тепла, аккумулируемое в прогретом слое плавящихся материалов  $Q_{\text{зап}}$ , определяется формулой (60).

Горение ряда ТГМ сопровождается образованием углистого слоя. Это древесина, древеснонаполненные пластмассы, материалы на основе целлюлозы, сшитые полимеры – реактопласты. Для них характерны два вида горения – гомогенное (пламенное) и гетерогенное (тление). Их соотношение зависит от интенсивности тепло- и газообмена у поверхности горения. В процессе горения углистый слой аккумулирует значительное количество тепла. Температура его поверхности достигает  $600 \div 700^\circ\text{C}$ , что является достаточным для зажигания горючих газовых смесей.

Удельный запас тепла  $Q_{\text{зап}}$ , накопленный в углистом слое твердого материала за время свободного горения равен:

$$Q_{\text{зап}} = q_{\text{зап}} \tau_{\text{гор}}, \text{кДж} / \text{м}^2, \quad (63)$$

где  $q_{\text{зап}}$  – тепловой поток, аккумулируемый пиролизующимся слоем,  $\text{кВт}/\text{м}^2$ ;  $\tau_{\text{гор}}$  – время свободного горения, с.

Значение  $q_{\text{зап}}$  определяется из уравнения теплового баланса горения:

$$q_{\text{вн}} = v_{\text{м}}^{\text{пр}} (L - L_{\text{экз}}) + q_{\text{зап}} + q_{\text{конв}}, \text{кВт} / \text{м}^2 \quad (64)$$

где  $q_{\text{вн}}$  – внешний лучистый тепловой поток, падающий на поверхность,  $\text{кВт}/\text{м}^2$ ;  $v_{\text{м}}^{\text{пр}}$  – приведенная массовая скорость выгорания,  $\text{кг}/(\text{с}\cdot\text{м}^2)$ ;  $L$  – теплота, затрачиваемая на пиролиз (газификацию) материала,  $\text{кДж}/\text{кг}$ ;  $L_{\text{экз}}$  – экзотермический эффект вторичных реакций пиролиза,  $\text{кДж}/\text{кг}$ ;  $q_{\text{конв}}$  – конвективный тепловой поток, исходящий от поверхности,  $\text{кВт}/\text{м}^2$ .

Отсюда:

$$Q_{\text{зап}} = [q_{\text{вн}} - v_{\text{м}}^{\text{пр}} (L - L_{\text{экз}}) - q_{\text{конв}}] \tau_{\text{гор}}, \text{кДж} / \text{м}^2 \quad (65)$$

Величина  $q_{\text{конв}}$  определяется теплосодержанием газообразных продуктов пиролиза:

$$q_{\text{конв}} = v_{\text{м}}^{\text{пр}} c_p (T_{\text{пов}} - T_{\text{пир}}), \text{кВт} / \text{м}^2 \quad (66)$$

---

$c_p$  – средняя удельная теплоемкость газов в интервале температур  $T_{\text{пов}} - T_{\text{пир}}$   
 $c_p \approx 3,7 \text{кДж}/(\text{кг}\cdot\text{K})$ ;  $T_{\text{пов}}$  – температура поверхности при горении,  $T_{\text{пов}} \approx 700^\circ\text{C}$ ;  
 $T_{\text{пир}}$  – температура пиролиза,  $T_{\text{пир}} \approx 200^\circ\text{C}$ . Теплота пиролиза  $L$  зависит от вида

горючего материала. Экзотермический эффект вторичных реакций пиролиза  $L_{\text{ЭКЗ}}$  присутствует при горении древесины и содержащих ее композиционных материалов. В расчетах  $L_{\text{ЭКЗ}}$ , приближенно, можно принимать равным 6% от низшей теплоты сгорания.

В результате, для ТГМ снижение температуры горения до температуры потухания без охлаждения прогретого слоя является условием тушения необходимым, но недостаточным, поскольку прогретый слой конденсированной фазы (твердого вещества или расплава), способен в течение некоторого времени поставлять нагретые продукты разложения и испарения в зону горения и являться источником их воспламенения. Поэтому при их тушении рассматривают еще одно – достаточное условие – снижение температуры прогретого слоя до температуры начала пиролиза или плавления.

Наиболее эффективным способом тушения ТГМ любого типа является принудительное охлаждение непосредственно поверхности горения. Время прекращения горения определяется интенсивностью теплоотвода от поверхности и термическим сопротивлением прогретого слоя.

Условие тушения ТГМ выполняется, если огнетушащее вещество подается на поверхность горения с такой интенсивностью, что за время тушения отбирает тепло, поступающее к поверхности, а также тепло, запасенное в прогретом слое за время горения:

$$Q_{\text{отв}} \geq Q_{\text{трѐб}} = Q_{\text{пов}} + Q_{\text{зап}}, \text{кДж} / \text{м}^2 \quad (67)$$

где  $Q_{\text{отв}}$  – тепло, отводимое огнетушащим веществом от  $1\text{м}^2$  поверхности,  $\text{кДж}/\text{м}^2$ ;  $Q_{\text{пов}}$  – тепло, поступающее к поверхности,  $\text{кДж}/\text{м}^2$ ;  $Q_{\text{зап}}$  – удельное теплосодержание прогретого слоя,  $\text{кДж}/\text{м}^2$ .

Здесь:

$$Q_{\text{пов}} = q_{\text{луч}} \tau_{\text{т}}, \text{кДж} / \text{м}^2 \quad (68)$$

где  $q_{\text{луч}}$  – плотность суммарного теплового потока, падающего от собственного пламени и внешних источников излучения,  $\text{кВт}/\text{м}^2$ ;  $\tau_{\text{т}}$  – время тушения, с.

Если подаваемое огнетушащее вещество поступает к поверхности без потерь и полностью реализует свою охлаждающую способность, количество тепла, отбираемое за время  $\tau_T$  от  $1\text{ м}^2$  поверхности горения  $Q_{\text{отв}}$  будет равно:

$$Q_{\text{отв}} = J * Q_{\text{охл}} * \tau_T, \text{ кДж} / \text{ м}^2 \quad (69)$$

где  $J$  – интенсивность подачи, л/(с·м<sup>2</sup>) или кг/(с·м<sup>2</sup>);  $\tau_T$  – время подачи огнетушащего вещества, с.

Отсюда теоретическое, минимально возможное, время тушения по механизму отвода тепла от поверхности:

$$\tau_T = \frac{Q_{\text{зан}}}{J * Q_{\text{охл}} - q_{\text{вн}}}, \text{ с} \quad (70)$$

При  $J = q_{\text{вн}}/Q_{\text{охл}}$ , т.е. когда подача огнетушащего вещества на поверхность компенсирует только внешние тепловые потоки,  $\tau_T \rightarrow \infty$ . Такая интенсивность подачи является критической  $J_{\text{кр}}$ .

При  $J \rightarrow \infty$  время тушения  $\tau_T \rightarrow 0$ . Однако минимальное время прекращения горения не может быть меньше времени охлаждения всего прогретого слоя  $\tau_0$ . Это физическое время определяется термическим сопротивлением материала. Например, при охлаждении древесины водой оно составляет примерно 20 с.

Таким образом, теоретическое время прекращения горения при тушении по поверхности определяется по формуле:

$$\tau_T = \frac{Q_{\text{зан}}}{J * Q_{\text{охл}} - q_{\text{вн}}} + \tau_0, \text{ с} \quad (71)$$

Охлаждающий эффект огнетушащего вещества зависит от его агрегатного состояния, теплоты фазового перехода, теплоемкости, способа тушения.

Умножив обе части (71) на  $J$ , получим выражение для удельного расхода:

$$q_{\text{уд}} \geq \frac{Q_{\text{зан}}}{J * Q_{\text{охл}} - q_{\text{вн}}} * J + \tau_0 * J, \text{ с} \quad (72)$$

Оптимальная интенсивность подачи – при которой обеспечивается минимальный удельный расход огнетушащего вещества, находится

дифференцированием уравнения (72) по  $J$ . Приравняв первую производную  $dq_{уд}/dJ$  к нулю, получим выражение для оптимальной интенсивности подачи:

$$J_{опт} = \frac{1}{Q_{охл}} * \left( \sqrt{\frac{Q_{зап} q_{вн}}{\tau_0} + q_{вн}} \right), \frac{\text{л}}{\text{м}^2 \text{с}} \quad (73)$$

Следует помнить, что значения  $q_{уд}$  и  $J_{опт}$ , получаемые по формулам (72) и (73), относятся к площади поверхности горения  $S_{пг}$ . Для определения секундного расхода ( $g$ , л/с) и минимального запаса воды, требуемых для тушения данной площади пожара  $S_{п}$ , их необходимо умножить на коэффициент поверхности.

### ***Задания для самостоятельного решения***

**Задача 1.** Определить критическую и оптимальную интенсивности подачи раствора пенообразователя по результатам опыта. Пена подавалась в течение 30с двумя ГПС-200. Площадь резервуара  $30\text{м}^2$ . Толщина слоя пены после тушения составила 0,3м.

#### **Решение**

Процесс прекращения горения жидкости пеной можно условно разделить на две стадии: растекания пены по зеркалу жидкости и накапливания изолирующего слоя. На обеих стадиях происходит разрушение пены под действием различных факторов. Накопление пены на поверхности горючего может начаться, если интенсивность ее подачи больше интенсивности разрушения. Необходимо помнить, что интенсивность подачи  $J$  всегда задается в л/(с×м<sup>2</sup>) по пенообразующему раствору. Произведение  $JK$  ( $K$  – кратность пены) равно интенсивности подачи пены. Интенсивность подачи, при которой количество подаваемой пены равно количеству разрушаемой, называется критической  $J_{кр}$ .

Очевидно, что объем слоя пены, накопленного за время тушения, равен разности объемов пены, поданной и разрушенной. Соответственно интенсивность накопления пены ( $J_{нак}$ ) равна  $J - J_{кр}$ . Отсюда критическая интенсивность подачи раствора равна:

$$J_{кр} = J - J_{нак}, \quad (74)$$

Если известен объем пены, накопленный к моменту тушения ( $V_{нак}$ ), величину  $J_{нак}$  можно вычислить по формуле:

$$J_{кр} = \frac{V_{нак} * 10^3}{\tau F_p K} = \frac{HF_p * 10^3}{\tau F_p K} = \frac{H * 10^3}{\tau K}, \quad (75)$$

где  $H$  – толщина накопленного слоя пены, м;  $F_p$  – площадь зеркала жидкости (резервуара), м<sup>2</sup>;  $\tau$  – время подачи пены, с;  $K$  – кратность пены.

Коэффициент  $10^3$  необходим для перевода м<sup>3</sup> в литры.

Оптимальной является интенсивность подачи  $J_{opt}$ , при которой удельный расход ( $q_{уд}$ ) раствора пенообразователя минимален. Известно, что зависимость времени тушения пеной от интенсивности подачи раствора может быть описана уравнением общего вида:

$$\tau = B \frac{J + J_{кр}}{J - J_{кр}} \quad (76)$$

где  $B$  – коэффициент, зависящий от вида пенообразователя и параметров пены, имеющий размерность времени.

Так как  $q_{уд} = Jt$ , можно записать:

$$q_{уд} = BJ \frac{J + J_{кр}}{J - J_{кр}}, \quad (77)$$

Для определения  $J_{opt}$  строят график зависимости  $q_{уд} = f(J)$  и находят значение  $J$ , при котором  $q_{уд}$  минимален. Коэффициент  $B$  можно принять равным 1, так как он не влияет на положение минимума.

Расчетная производительность пеногенераторов типа ГПС составляет:

ГПС-200 – 2л/с, ГПС-600 – 6л/с, ГПС-2000 – 20л/с.

1. Находим интенсивность подачи раствора:

$$J = gn / S_p = 2 * 2 / 30 = 0,12 \text{ л} / (\text{м}^2 * \text{с}),$$

где  $g$  – производительность пеногенератора по раствору, л/с;  $n$  – число пеногенераторов;  $S_p$  – площадь резервуара, м<sup>2</sup>.

2. Принимая  $K_{\text{пены}} = 100$ , определяем интенсивность накопления пены:

$$J_{\text{нак}} = \frac{0,3 \cdot 10^3}{30 \cdot 100} = 0,1 \text{ л} / (\text{м}^2 \cdot \text{с})$$

3. Находим критическую интенсивность подачи:

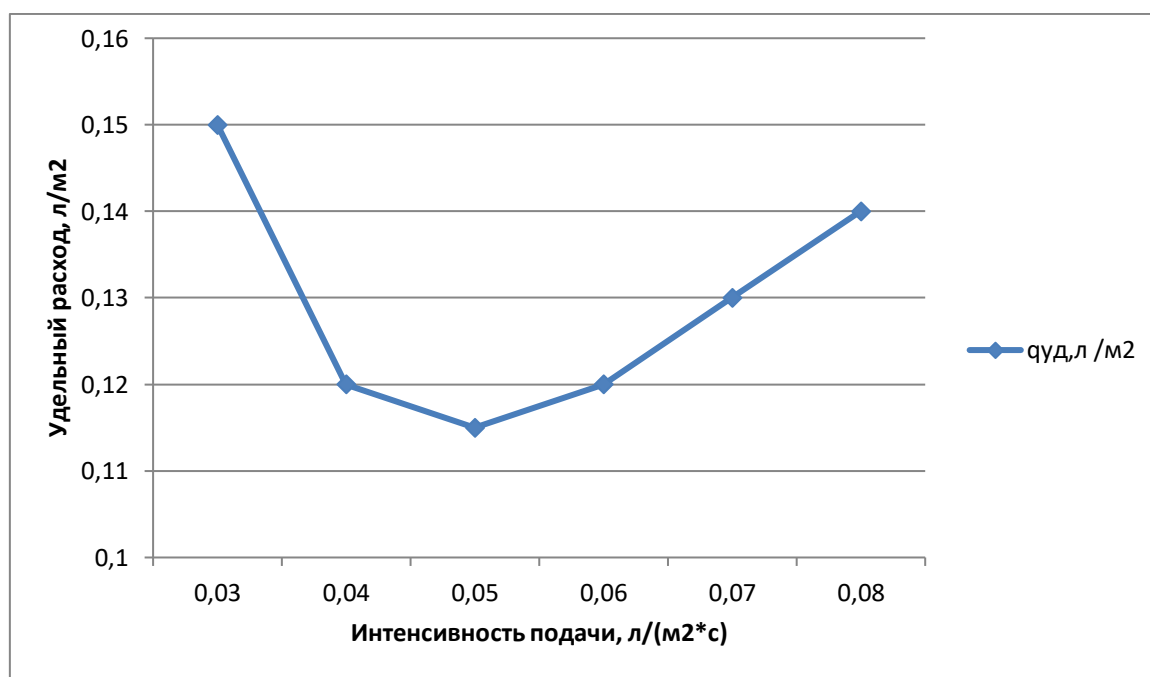
$$J_{\text{кр}} = 0,12 - 0,1 = 0,02 \text{ л} / (\text{м}^2 \cdot \text{л})$$

4. Строим график (рисунок)  $q_{\text{уд}} = f(J)$ . Поскольку из практики известно, что  $J_{\text{опт}} = 1,5 J_{\text{кр}}$ , задаем следующие значения  $J$ : 0,03; 0,04; 0,05; 0,06; 0,07; и 0,08 л/(с×м<sup>2</sup>). Принимаем  $V = 1\text{с}$ . По формуле (77) получаем следующие значения  $q_{\text{уд}}$ :

Таблица 24

Полученные данные

	$q_{\text{уд, л}} / \text{м}^2$
0,03	0,15
0,04	0,12
0,05	0,115
0,06	0,12
0,07	0,13
0,08	0,14



Ответ:  $J_{кр} = 0,05 \text{ л}/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$ ,  $J_{опт} = 0,075 \text{ л}/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$ .

Таблица 25

Данные для расчетов

Номер варианта	Пеногенератор	$n$	$S_p, \text{ м}^2$	$t, \text{ с}$	$H, \text{ м}$
1	ГПС-200	2	28	40	0,4
2	ГПС-600	2	113	60	0,5
3	ГПС-600	3	113	60	0,4
4	ГПС-200	1	28	60	0,3
5	ГПС-200	3	78	50	0,3
6	ГПС-200	2	78	90	0,4
7	ГПС-200	2	28	50	0,6
8	ГПС-600	4	314	90	0,6
9	ГПС-200	3	78	30	0,2
10	ГПС-200	2	28	50	0,6
11	ГПС-200	2	28	30	0,3
12	ГПС-600	2	113	40	0,4
13	ГПС-600	3	113	50	0,2
14	ГПС-200	1	28	40	0,3
15	ГПС-200	3	78	30	0,4
16	ГПС-200	2	78	40	0,5
17	ГПС-200	2	28	30	0,7
18	ГПС-600	4	314	50	0,8
19	ГПС-200	3	78	60	0,9
20	ГПС-200	2	28	40	0,6
21	ГПС-200	2	48	40	0,4
22	ГПС-200	2	55	60	0,5
23	ГПС-600	4	54	60	0,4
24	ГПС-600	3	68	60	0,3
25	ГПС-200	2	72	50	0,3
26	ГПС-200	2	74	90	0,4
27	ГПС-200	2	78	50	0,4
28	ГПС-200	3	82	90	0,5
29	ГПС-600	1	86	30	0,4
30	ГПС-200	2	92	50	0,3

**Задача 2.** Рассчитать теоретическую оптимальную интенсивность подачи, удельный расход воды для тушения поверхности горячей древесины, требуемый секундный расход огнетушащего вещества, если массовая приведенная скорость выгорания  $\nu_m^{пр} = 0,0085 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ , внешний падающий



тепловой поток  $q_{\text{вн}} = 40 \text{ кВт/м}^2$ , время свободного горения 600 с. Удельную теплоту пиролиза  $L$  принять равной 2800 кДж/кг, низшую теплоту сгорания – 14200 кДж/кг. Теоретический охлаждающий эффект воды 2600 кДж/кг.  $K_{\text{п}}=4$ .

Решение:

Для прекращения горения древесины требуется понизить температуру ее поверхности с  $T_{\text{пов}}$  до температуры начала активного пиролиза  $T_{\text{пир}}$ . Оптимальная интенсивность подачи рассчитывается по формуле (73):

$$J_{\text{опт}} = \frac{1}{Q_{\text{охл}}} \left( \sqrt{\frac{Q_{\text{зап}} * q_{\text{вн}}}{\tau_0}} + q_{\text{вн}} \right), \text{ л / (м}^2 * \text{с)}$$

Значение  $Q_{\text{зап}}$  находится по выражению (65) с использованием (64):

$$Q_{\text{зап}} = [q_{\text{вн}} - v_m^{np} (L - L_{\text{экз}}) - q_{\text{конв}}] * \tau_{\text{гор}}, \text{ кДжс / м}^2$$

$$L_{\text{экз}} = 0,06 * Q_{\text{н}}, \text{ кДжс / кг},$$

$$q_{\text{конв}} = v_m^{np} * c_p (T_{\text{пов}} - T_{\text{пир}}), \text{ кВт / м}^2.$$

Подставив исходные данные, получим:

$$q_{\text{конв}} = 0,0085 * 3,7 * (700 - 200) = 15,7 \text{ кВт / м}^2$$

$$L_{\text{экз}} = 0,06 * 14200 = 852 \text{ кДжс / кг}$$

$$Q_{\text{зап}} = [40 - 0,0085 * (2800 - 852) - 15,7] * 600 = 4645 \text{ кДжс / м}^2$$

Отсюда оптимальная интенсивность подачи:

$$J_{\text{опт}} = \frac{1}{2600} \left( \sqrt{\frac{4645 * 40}{20}} + 40 \right) = 0,052 \text{ л / (м}^2 * \text{с)}$$

Удельный расход огнетушащего вещества равен интенсивности подачи, умноженной на  $\tau_{\text{т}}$ . Время тушения  $\tau_{\text{т}}$  находим по формуле (71):

$$\tau_{\text{т}} = \frac{Q_{\text{зап}}}{J * Q_{\text{охл}} - q_{\text{вн}}} + \tau_0 = \frac{4645}{0,052 * 2600 - 40} + 20 \approx 69 \text{ с.}$$

Определяем удельный расход воды (в расчете на площадь горения) при оптимальной интенсивности подачи:

$$q_{\text{уд}} = 0,052 * 69 = 3,6 \text{ л / м}^2.$$

Для расчета требуемого секундного расхода воды (g, л/с) и количества значение  $J_{\text{опт}}$  умножаем на коэффициент поверхности  $K_{\text{п}}$ .

$$q_c = 3,6 \text{ л/м}^2 * 4 = 14,4 \text{ л/м}^2.$$

Таблица 26

Данные для расчетов

№ варианта	$v_m^{пр}$ , кг/(м <sup>2</sup> ·с)	$q_{вн}$ , кВт/м <sup>2</sup>	Время свободного горения, мин	$Q_H$ , кДж/кг
1	0,0075	34	5	18500
2	0,0080	35	8	18700
3	0,0055	36	12	19000
4	0,0060	40	7	19200
5	0,0065	43	3	19500
6	0,0070	42	7	19900
7	0,0085	41	8	20000
8	0,0080	39	9	20300
9	0,0065	38	6	20800
10	0,0075	37	5	18500
11	0,0085	42	9	18700
12	0,009	45	11	19000
13	0,0075	41	10	19200
14	0,008	48	12	19500
15	0,0085	42	14	19900
16	0,009	48	14	20000
17	0,0095	44	12	20300
18	0,0085	42	13	20800
19	0,0065	46	15	18500
20	0,0055	47	15	18700
21	0,0075	30	11	19900
22	0,0085	31	12	20000
23	0,009	32	13	20300
24	0,0075	33	14	20800
25	0,008	34	15	19900
26	0,0075	35	16	20000
27	0,0085	36	17	20300
28	0,009	37	18	20800
29	0,0075	38	13	19900
30	0,008	39	12	20000

## Тема № 10. Огнетушащие вещества и механизм огнетушащего действия

Под *огнетушащими средствами* (ОС) понимают различные вещества и материалы, с помощью которых непосредственно создаются различные условия прекращения горения.

Все ОС классифицируются по двум признакам: агрегатному состоянию и механизму прекращения горения.

*По агрегатному состоянию* они подразделяются

- на жидкие (вода, водные растворы смачивателей и т. д.);
- пенные (воздушно-механические и химическая пены);
- порошковые составы;
- сыпучие материалы (песок, земля, специальные составы и т. д.);
- газообразные (нейтральные газы).

*По механизму прекращения горения* все ОС подразделяются

- на охлаждающие зону химической реакции или горящие вещества (вода, водные растворы смачивателей, твердый диоксид углерода и т. д.);
- разбавляющие вещества в зоне реакций горения (нейтральные газы, водяной пар и т. д.);
- изолирующие горючие вещества от зоны горения (химическая и воздушно-механическая пены, негорючие сыпучие материалы, листовые материалы и т. д.);
- химически тормозящие (ингибирующие) реакцию горения (хладоны).

Все огнетушащие составы оказывают комбинированное воздействие на процесс горения. Вода, например, может охлаждать и изолировать (или разбавлять) источник горения; порошковые составы изолируют и тормозят реакцию горения; наиболее эффективные газовые составы разбавляют и тормозят реакцию горения и т. д. Однако любое огнетушащее средство обладает одним доминирующим свойством, которое и необходимо учитывать при выборе ОС в конкретных условиях пожара.

Широко распространены в природе естественные ОС (вода, песок и др.). Кроме того, современные технологии позволяют получать такие ОС, которые отсутствуют в природе. Однако не все ОС могут быть взяты на вооружение органами и подразделениями по чрезвычайным ситуациям, а лишь те, которые отвечают определенным требованиям:

- обладают высоким эффектом тушения при сравнительно малом расходе;
- доступны, просты в использовании и имеют низкую стоимость;
- не оказывают вредного воздействия при их применении на людей и материалы, являются экологически чистыми.

### ***Расчет расхода воды, требуемой для прекращения горения газового фонтана***

При тушении пожаров газовых фонтанов возникает необходимость в оценке расхода газа (дебита  $D$ ) фонтана, так как его величина определяет расход воды на тушение пожара. Непосредственное измерение расхода газа для горящего фонтана в большинстве случаев невозможно, а эффективных дистанционных способов определения расхода струи не существует. Достаточно точно дебит мощных газовых фонтанов может быть определен по высоте факела  $H_{\phi}$  в млн. м<sup>3</sup>/сут:

$$D = 0.0025 \cdot H_{\phi}^2. \quad (78)$$

Секундный расход воды для прекращения пламенного горения газового фонтана можно определить по эмпирической формуле

$$V_B = \frac{V_\Gamma g_{\text{уд, H}_2\text{O}}}{K_{\text{и}}}, \quad (79)$$

где  $V_\Gamma$  – секундный расход газа, м<sup>3</sup>/с;  $g_{\text{уд, H}_2\text{O}}$  – удельный расход воды на тушение факела пламени, л/м<sup>3</sup>; ( $g_{\text{уд, H}_2\text{O}} \approx 1$  л/м<sup>3</sup> для метано-воздушной смеси);  $K_{\text{и}}$  – коэффициент использования воды.

Горение газового фонтана характеризуется высоким уровнем теплового излучения. Интенсивность лучистого потока от факела пламени, приходящаяся на единицу площади поверхности окружающих тел, называют *плотностью лучистого потока*, или *облучённостью* ( $E$ ). Её обычно выражают в кВт/м<sup>2</sup>.

Величина облучённости определяет границы локальных зон теплового воздействия факела пламени, в пределах которого предъявляются определённые требования к экипировке личного состава, выполняющего боевые действия по тушению пожара, и ко времени пребывания в данных зонах.

Величину облучённости от факела пламени горящего фонтана в зависимости от расстояния до устья скважины можно рассчитать следующим образом

$$E = \frac{\eta_{\text{л}} Q_{\text{с, об}}^{\text{H}} V_\Gamma}{4\pi R^2}, \quad (80)$$

где  $\eta_{\text{л}}$  – коэффициент потерь тепла излучением;  $Q_{\text{с, об}}^{\text{H}}$  – низшая теплота сгорания фонтанирующего газа, кДж/м<sup>3</sup>;  $V_\Gamma$  – секундный расход газа, м<sup>3</sup>/с;  $R$  – длина гипотенузы в треугольнике, катетами которого являются половина высоты факела фонтана и расстояние от устья скважины до места облучения ( $L$ ), м (рисунок 6).

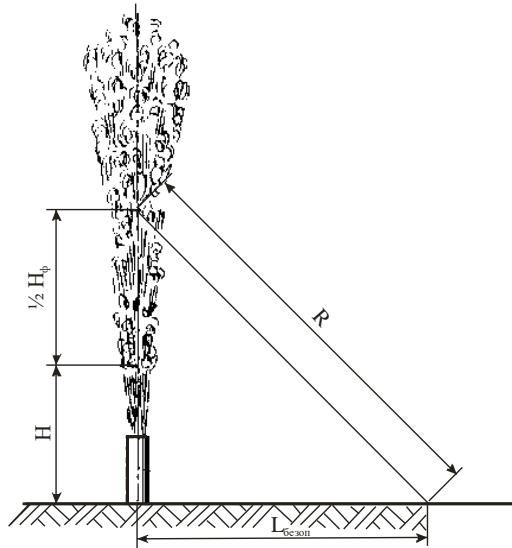


Рисунок 6 - Схема для расчёта облучённости от факела пламени газового фонтана

Очевидно, что

$$R^2 = \left( \frac{H_{\phi}}{2} \right)^2 + L^2. \quad (81)$$

Тогда из (80 и 81) следует, что

$$E = \frac{\eta_{д} Q^{H, об} V_{г}}{4\pi \left[ \left( \frac{H_{\phi}}{2} \right)^2 + L^2 \right]}. \quad (82)$$

Расстояние от устья скважины, в пределах которого облучённость не превышает  $1,6 \text{ кВт/м}^2$ , является *безопасным* для работы личного состава без специальных средств защиты в течение неопределённо долгого времени.

При уровне облучённости до  $4,2 \text{ кВт/м}^2$  допустимо нахождение бойцов без специального теплозащитного снаряжения не более 15 мин при условии защиты открытых кожных покровов (перчатки, защитные щитки). Специальное теплозащитное снаряжение и защита с использованием распылённых водяных струй позволяют вести работу при облучённости до  $14 \text{ кВт/м}^2$ .

### Задания для самостоятельного решения

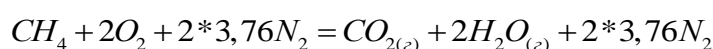
**Задача 1.** Дайте обоснованное заключение о необходимости применения специального теплозащитного снаряжения при тушении пожара газового

фонтана мощностью 3 млн. м<sup>3</sup>/сут., если расстояние от места нахождения бойцов до устья скважины составляет 40 м. Высота факела пламени 38 м. Потери тепла излучением составляют 21 %. Состав фонтанирующего газа: CH<sub>4</sub> – 80 об. %, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> – 15 об. %, CO<sub>2</sub> – 5 об. %.

*Решение.*

Величину облучённости от факела пламени горящего фонтана можно рассчитать по формуле (82). Для использования данной формулы сначала необходимо определить низшую теплоту сгорания газовой смеси. Для этого воспользуемся следствием из закона Гесса.

Рассчитаем теплоту сгорания ( $-\Delta_c H_T^0 = Q_H$ ) метана и этана. Запишем реакции горения:



Согласно первому следствию из закона Гесса, теплота сгорания метана будет равна

$$\begin{aligned} Q_H^c &= -\{\Delta_f H_{298}^0(CO_2) + 2\Delta_f H_{298}^0(H_2O) - \Delta_f H_{298}^0(CH_4)\} = \\ &= -\{(-393,51) + 2 \cdot (-241,81) - (-74,85)\} \text{ кДж / моль} = 802,29 \text{ кДж / моль} \end{aligned}$$

Значение низшей теплоты сгорания 1 м<sup>3</sup> метана рассчитаем по формуле:

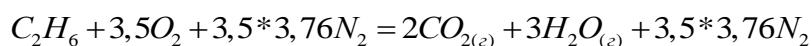
$$Q_{c,об}^H = -Q_c^H \frac{1000}{24,45},$$

где 24,45 л – объем одного мольгаза при T = 298 К.

Отсюда низшая теплота сгорания 1 м<sup>3</sup> метана будет равна

$$Q_{c,об(CH_4)}^H = 802,29 \cdot 100 / 24,45 = 32813,5 \text{ кДж / м}^3$$

Запишем реакцию горения этана:



Согласно первому следствию из закона Гесса, теплота сгорания этана будет равна

$$\begin{aligned} Q_H^c &= -\{2 \cdot \Delta_f H_{298}^0(CO_2) + 3\Delta_f H_{298}^0(H_2O) - \Delta_f H_{298}^0(C_2H_6)\} = \\ &= -\{2 \cdot (-393,51) + 3 \cdot (-241,81) - (-84,67)\} \text{ кДж / моль} = 1427,81 \text{ кДж / моль} \end{aligned}$$

Рассчитанная по аналогии с метаном теплота сгорания 1 м<sup>3</sup> этана будет равна 58 397,1 кДж/м<sup>3</sup>.

Поскольку в 1 м<sup>3</sup> исходной газовой смеси содержится 80 об. % (0,80) метана и 15 об. % (0,15) этана, то общая теплота сгорания 1 м<sup>3</sup> смеси составит:

$$Q_{H,об}^c = 32813,5 \cdot 0,8 + 58397,1 \cdot 0,15 = 35010 \text{ кДж} / \text{м}^3$$

Переводим суточный расход газа в секундный расход:

$$V_c = \frac{3 \text{ млн} \cdot \text{м}^3 / \text{сутки}}{24 \cdot 60 \cdot 60} = 34,7 \text{ м}^3 / \text{с}$$

Подставляем известные параметры горения фонтана в формулу (82):

$$E = \frac{\eta_{л} Q_{с,об}^H V_{Г}}{4\pi \left[ \left( \frac{H_{ф}}{2} \right)^2 + L^2 \right]} = \frac{0,21 \cdot 35\,010 \cdot 34,7}{4 \cdot 3,14 \cdot \left[ \left( \frac{38}{2} \right)^2 + 40^2 \right]} = 10,35 \text{ кВт/м}^2 \cdot$$

Сравнив величину облучённости со значением 4,2 кВт/м<sup>2</sup>, делаем вывод о необходимости использования специальных средств защиты от теплового излучения.

*Ответ:* при тушении пожара газового фонтана мощностью 3 млн. м<sup>3</sup>/сут. на расстоянии 40 м от устья скважины необходимо применять специальное теплозащитное снаряжение.

Таблица 27

Данные для расчета

№ варианта	Состав, %			
	CH <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	CO <sub>2</sub>
1	61	5	27	7
2	59	6	28	7
3	60	7	27	6
4	58	8	28	6
5	57	9	29	5
6	56	10	28	6
7	55	9	23	3
8	54	8	34	4
9	53	7	34	6



10	52	6	32	10
11	51	5	36	8
12	50	4	38	8
13	49	3	40	8
14	48	2	42	8
15	47	8	39	6
16	49	9	35	7
17	45	7	40	8
18	44	6	41	9
19	43	5	59	11
20	42	4	44	10

## Тема № 11. Параметры прекращения горения

### Задания для самостоятельного решения

**Задача 1.** Рассчитать параметры пожара компактного газового фонтана: дебит  $D$ , теплоту пожара  $q_n$ , коэффициент излучения пламени в окружающую среду  $f$ . Определить расстояние  $L$ , на котором плотность теплового потока равна 4 и 14 кВт/м<sup>2</sup>. Состав газа: А % метана, В % этана, С % пропана, D % азота и Е% бутана. Высота факела  $F$  м, высота скважины 1 м, внутренний диаметр трубы 102 мм. Низшая теплота сгорания метана 802 кДж/моль, этана – 1576 кДж/моль, пропана – 2044 кДж/моль, бутана – 2657 кДж/моль.

### Решение

Дебит фонтана рассчитывается по формуле

$$D \approx 0,0025 * H_{\phi} \approx 0,0025 * 35^2 \text{ млн} * \text{м}^3 / \text{сутки} = 3 \text{ млн} * \text{м}^3 / \text{сутки}$$

Теплота пожара  $q_n$ , кВт, определяется по формуле

$$q_n = v_m^{abc} * Q_H * \beta$$

Для газовых фонтанов коэффициент  $\beta \approx 1$ , скорость сгорания равна секунднему расходу газа  $v_r$ . Соответственно значение  $Q_H$  следует подставлять в кДж/м<sup>3</sup>, т. е.

$$q_n = v_z * Q_H^{cm}$$

Низшая теплота сгорания смеси газов определяется по формуле

$$Q_H^{cm} = \sum Q_{Hi} \alpha_i$$

где  $Q_{Hi}$  – низшая теплота сгорания  $i$ -го горючего компонента;

$\alpha_i$  – доля  $i$ -го компонента в смеси.

Подставив значения  $Q_{Hi}$  каждого горючего компонента в формулу, получим

$$Q_H^{cm} = 0,85 * 802 + 0,09 * 1576 + 0,03 * 2044 + 0,01 * 2657 = 911,4 \text{ кДж / моль}$$

1 моль газа занимает объем 22,4 л, следовательно:

$$Q_H^{cm} = 911400 \text{ Дж / моль} / 22,4 * 10^{-3} \text{ моль / м}^3 = 40687,5 \text{ КДж / м}^3$$

Секундный расход газа

$$v_z = 3 * 10^6 \text{ м}^3 / \text{сутки} / 24 * 60 * 60 = 34,7 \text{ м}^3 / \text{с}$$

Теплота пожара данного фонтана

$$q_n = 34,7 \text{ м}^3 / \text{с} * 40687,5 \text{ КДж / м}^3 = 1411856,2 \text{ кВт} = 1411,9 \text{ МВт}$$

Коэффициент излучения представляет собой долю теплоты сгорания, теряемую в виде лучистой энергии в окружающую среду. Для углеводородов он находится по формуле

$$f = 0,05 \sqrt{M}$$

Средняя молярная масса горючих компонентов смеси равна

$$M = \sum M_i \alpha_i$$

$$M = (0,85 * 16 + 0,09 * 30 + 0,03 * 44 + 0,01 * 58) \text{ кг / кмоль} = 18,2 \text{ кг / кмоль}$$

Коэффициент излучения

$$f = 0,05 * \sqrt{18,2} = 0,21$$

При расчете расстояния  $L$  принимается, что источником излучения пламени фонтана является точка, расположенная в его геометрическом центре, т.е. на высоте  $H_{\phi}/2$  от устья скважины

Тогда плотность потока излучения  $W$  через сферу  $R$  радиусом  $R$ , исходя, из формулы  $q_n = f * Q_H * v_z$  равна:

$$W = \frac{q_{\text{л}}}{4\pi R^2} = \frac{f * Q_H * v_z}{4\pi R^2}$$

Откуда расстояние R, на котором плотность лучистого теплового потока равна заданному значению  $q_{\text{зад}}$ , определяется выражением

$$R = \sqrt{\frac{f * Q_H * v_z}{4\pi q_{\text{зад}}}}$$

Расстояние  $R_1$  для  $q_{\text{зад}}=4$  кВт/м<sup>2</sup>

$$R = \sqrt{\frac{0,21 * 1411856,2}{4 * 3,14 * 4}} = 76,8 \text{ м}$$

Расстояние  $R_2$  для  $q_{\text{зад}}=14$  кВт/м<sup>2</sup>

$$R = \sqrt{\frac{0,21 * 1411856,2}{4 * 3,14 * 14}} = 41 \text{ м}$$

Очевидно, что соответствующее расстояние от скважины на уровне земли L равно

$$L = \sqrt{R^2 - (0,5H_{\phi} + H_m)^2}$$

Расстояние  $L_1$  для  $q_{\text{зад}} = 4 \text{ кВт} / \text{м}^2$

$$L = \sqrt{76,8^2 - (0,5 * 35 + 1)^2} = 74,5 \text{ м}$$

Таблица 28

Данные для расчета

№ варианта	Состав, %					F, м
	CH <sub>4</sub> , %	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> , %	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> , %	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> , %	N <sub>2</sub> , %	
1	85	9	3	1	2	35
2	86	8	3	1	2	34
3	87	7	3	2	1	33
4	88	6	3	1	2	32
5	89	5	3	2	1	31
6	90	5	2	2	1	30
7	80	10	5	3	2	29
8	81	9	5	3	2	31
9	82	8	5	3	2	34
10	81	9	3	5	2	35
11	80	9	3	6	2	36
12	81	8	3	6	2	37
13	82	7	3	7	1	29
14	83	6	3	6	2	32

15	84	5	3	7	1	31
16	85	5	2	7	1	32
17	80	10	5	3	2	34
18	76	9	5	8	2	35
19	81	9	5	3	2	34
20	78	9	6	5	2	37

### 3. ПРИМЕРНЫЕ ВОПРОСЫ К ЭКЗАМЕНУ

1. Общая характеристика горения. Классификация процессов горения.
2. Механизм горения газов. Характеристики процесса горения газов.
3. Механизм горения аэрозвесей. Свойства, определяющие пожаро- и взрывоопасность аэрозвесей.
4. Механизм возникновения пламени на поверхности жидкости. Диффузионное горение жидкостей.
5. Температура вспышки. Температура воспламенения. Расчетные и экспериментальные методы определения температуры вспышки и воспламенения горючих жидкостей.
6. Скорость распространения пламени. Удельная массовая и линейная скорости выгорания жидкости.
7. Воспламенение твердых веществ и материалов. Особенности механизма зажигания и распространения пламени.
8. Индекс распространения пламени по поверхности и методы его определения.
9. Линейная и массовая скорости выгорания. Расчетные и экспериментальные методы определения массовой скорости выгорания.
10. Особенности горения металлов.
11. Тление, механизм и способы предотвращения возникновения и развития процессов тления.
12. Особенности горения полимерных материалов.
13. Система показателей и оценка пожарной опасности веществ и материалов, область их применения.
14. Показатели пожарной опасности газов, жидкостей, твердых веществ и пылей.
15. Основные явления и процессы при пожарах. Опасные факторы пожаров.
16. Параметры пожаров. Основные стадии и динамика пожаров.

17. Постоянная и переменная пожарная нагрузка. Классификация пожаров по пожарной нагрузке.

18. Пожары газовых фонтанов. Классификация пожаров газовых фонтанов.

19. Пожары резервуаров. Физико-химические процессы при горении жидкостей в резервуарах, образование гомотермического слоя

20. Открытые пожары твердых горючих материалов. Особенности горения твердых горючих материалов.

21. Лесные, торфяные и степные пожары.

22. Основные стадии и фазы внутренних пожаров.

23. Тепло- и газообмен на внутренних пожарах. Механизм и параметры газообмена при пожаре в помещении.

24. Тепловой баланс внутреннего пожара.

25. Влияние аэродинамических условий на скорость и направление распространения фронта горения.

26. Высокотемпературный и низкотемпературный режимы пожаров.

27. Методы определения основных параметров пожара.

28. Расчет площади внутреннего пожара.

29. Тепловая теория прекращения горения.

30. Природа тепловыделения при диффузионном горении.

31. Природа теплоотдачи при диффузионном горении.

32. Температура прекращения горения и пути её достижения.

33. Физико-механические способы тушения пламени. Поверхностное и объемное тушение.

34. Условия, необходимые для прекращения горения. Влияние режима горения и агрегатного состояния пожарной нагрузки на способы тушения пожара.

35. Понятие «огнетушащие вещества», их виды, свойства, область применения, эксплуатационные особенности.

36. Классификация огнетушащих веществ по механизму действия на процесс горения.

37. Вода как огнетушащее вещество. Механизм гасящего действия воды в зависимости от способа ее подачи, режима горения, пожарной нагрузки и ее вида.

38. Теоретический и практический расход воды на тушение.

39. Пены как огнетушащие вещества. Основные свойства пен и способы их получения.

40. Пенообразователи, применяемые в пожарном деле.

41. Негорючие газы (флегматизаторы), их основные физико-химические, токсические и коррозионные свойства.

42. Механизм гасящего действия негорючих газов, огнетушащие концентрации. Эксплуатационные особенности и области применения.

43. Галогеноуглеводороды (хладоны) и их применение в качестве ингибиторов горения. Основные физико-химические, токсические и эксплуатационные свойства.

44. Механизм ингибирующего действия хладонов на процессы горения. Основные представители огнетушащих хладонов и область их применения.

45. Огнетушащие порошковые составы, механизм огнетушащего действия.

46. Физико-химические и эксплуатационные свойства огнетушащих порошков, их особенности. Основные представители порошковых составов и область их применения для тушения пожаров.

47. Комбинированные огнетушащие составы и механизм их действия. Принципы разработки комбинированных способов тушения, их использование в практике пожаротушения.

48. Основные параметры прекращения горения на пожарах: интенсивность подачи, удельный расход огнетушащего вещества, показатель эффективности тушения.

49. Расчет теоретических удельных расходов, интенсивности подачи огнетушащих средств (на примере воды, пен и негорючих газов) при тушении различных пожаров.

50. Коэффициент использования огнетушащих средств и методы его повышения.



## 4. ПРИМЕРНЫЕ ВАРИАНТЫ ЭКЗАМЕНАЦИОННЫХ ЗАДАЧ

1. Определить объемы воздуха (теоретический и действительный) при нормальных условиях, если при пожаре на складе сгорело 1000 кг этанола, а горение протекало при  $\alpha=1,2$ .

2. Определить объемы продуктов горения 5 м<sup>3</sup> пропана при нормальных условиях, если горение протекало при  $\alpha=1,3$ .

3. Газовая смесь объемом 1,5 м<sup>3</sup>, состоящая из 30 % ацетилена, 30 % метана, 10 % углекислого газа и 30 % кислорода сгорает с 40%-ным избытком воздуха. Вычислить объем воздуха, принимающего участие в горении (при нормальных условиях).

4. Определить температуру горения вещества, имеющего следующий элементный состав: С – 50 %, Н – 10 %, N - 20 %, золы – 8 %, влаги – 12 %. Горение протекает при коэффициенте избытка воздуха, равном 1,5, а теплотери на излучение составляют 40 %.

5. Определить температуру горения газовой смеси, состоящей из 50 % метана, 10 % этана, 10 % пропана, 10 % углекислого газа и 20 % кислорода. Горение протекает при коэффициенте избытка воздуха, равном 1,2, а теплотери на излучение составляют 30 %.

6. Определить приведенную массовую скорость выгорания пожарной нагрузки в виде куба, имеющего грань, длиной 2 м, если за 30 мин. выгорело 10 % его массы. Плотность материала 300 кг/м<sup>3</sup>.

7. Насколько опустится уровень дизельного топлива за 25 минут горения в резервуаре. Плотность массы дизельного топлива составляет 730 кг/м<sup>3</sup>, удельная массовая скорость выгорания равна 0,33 кг/(м<sup>2</sup>·мин).

8. Определить массовую скорость выгорания материала при площади пожара 150 и 10 м<sup>2</sup>, если значение удельной массовой скорости выгорания равно 0,02 кг/(м<sup>2</sup>·с).

9. Сравните массовую скорость выгорания текстолита на площади пожара 250 и 10 м<sup>2</sup>, если значение удельной массовой скорости выгорания равно 0,0067 кг/(м<sup>2</sup>·с).

10. Определить количество воды, которое необходимо подать для охлаждения стен цеха из огнеупорного кирпича, чтобы снизить их температуру в три раза, если их исходная температура составила 600 °С. Масса кирпичной кладки 150 т, изобарная теплоёмкость кирпича  $C_p^{\text{кирп}}=0,837$  кДж/(кг·град). Принять коэффициент использования воды равен  $K_{\text{и}}=0,25$ .

11. Определить интенсивность подачи тонкораспылённой воды, теоретически необходимой для тушения пламени керосина в резервуаре диаметром 4 м. Приведённая массовая скорость выгорания составляет 3,27 кг/(м<sup>2</sup>·мин), низшая теплота сгорания 1985 кДж/моль, коэффициент полноты сгорания  $\beta=0,85$ . Температура пламени керосина 1200 °С.

12. Для прекращения горения твердого горючего материала от 1 м<sup>2</sup> его поверхности необходимо отвести 4000 кДж тепла в течение 2 мин. Определить требуемые удельный расход и интенсивность подачи воды, если коэффициент ее использования равен 0,1.

13. Определить секундный расход воды для прекращения пламенного горения газового фонтана мощностью 2,5 млн. м<sup>3</sup>/сут. при коэффициенте использования воды  $K_{\text{и}}=0,4$ .

14. Расчётным путём определить границы локальной зоны теплового воздействия факела пламени газового фонтана мощностью 12,3 млн. м<sup>3</sup>/сут., на которой личный состав может вести боевую работу без дополнительных средств защиты от теплового излучения в течение неограниченного времени. Потери тепла излучением 19 %, высота факела пламени 46 м. Состав газового фонтана: CH<sub>4</sub> – 78 об. %, C<sub>3</sub>H<sub>8</sub> – 18 об. %, H<sub>2</sub>S – 4 %.

15. Какова критическая и оптимальная интенсивность подачи пены кратностью 90 на тушение дизельного топлива, если радиус его разлива 5,4 м? Тушение осуществлялось двумя пеногенераторами ГПС-600

(производительность 6 л/с) в течение 4 мин, а толщина слоя пены после тушения составила 0,63 м.

16. Определить толщину слоя пены, образующегося при тушении штабеля каменного угля размерами  $8 \times 12$  м, если пена средней кратности ( $K_{\text{п}} = 110$ ) подавалась двумя генераторами ГПС-600 (производительность 6 л/с) в течение 3 мин. Интенсивность накопления пены  $0,054$  л/(м<sup>2</sup>·с). Какова оптимальная интенсивность подачи пены на тушение?

## ГЛОССАРИЙ

**Время тушения**  $\tau_t$ , – время от начала подачи огнетушащего вещества до момента прекращения горения (с, мин).

**Зона горения** – часть пространства, в которой протекают процессы термической подготовки горючих веществ и само горение; зона горения включает объем, ограниченный фронтом пламени и поверхностью горящего вещества.

**Зона задымления** – примыкающая к зоне горения часть пространства, в которой невозможно пребывание людей без средств защиты органов дыхания или осложнено ориентирование в результате недостаточной видимости.

**Зона теплового влияния** – прилегающая к зоне горения часть пространства, в границах которой протекают процессы теплообмена между поверхностью зоны горения и окружающими конструкциями и веществами.

**Интенсивность газообмена  $IG$**  – количество воздуха, который притекает в единицу времени к единице площади пожара ( $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ ).

**Интенсивность подачи  $J$**  – количество огнетушащего вещества, подаваемое на  $1 \text{ м}^2$  площади пожара в секунду ( $\text{л}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ ).

**Коэффициент избытка воздуха** – отношение фактического секундного массового расхода воздуха, поступающего в зону горения, к теоретически необходимому секундному массовому расходу воздуха для осуществления процесса горения.

**Коэффициент поверхности горения (коэффициент пожарной нагрузки)  $K_n$**  – отношение площади поверхности горения к площади пожара.

**Линейная скорость распространения пожара  $v_d$**  – расстояние, которое проходит фронт пожара за единицу времени ( $\text{м}/\text{с}$ ).

**Огнетушащие средства (ОС)** – различные вещества и материалы, с помощью которых непосредственно создаются различные условия прекращения горения.

**Площадь поверхности горения** характеризует реальную площадь горючего, которая участвует в горении ( $\text{м}^2$ ).

**Площадь пожара** – площадь проекции зоны горения на горизонтальную или вертикальную плоскость ( $\text{м}^2$ ).

**Пожар** – неконтролируемое горение вне специального ограждения, приносящее материальные и моральные убытки.

**Пожары, регулируемые вентиляцией (ПРВ)** – пожары, которые протекают при ограниченном содержании кислорода в газовой среде помещения и избытке горючих веществ и материалов.

**Пожары, регулируемые пожарной нагрузкой (ПРН)** – пожары, протекающие при избытке воздуха для горения. Развитие такого пожара зависит от количества пожарной нагрузки.

**Скорость выгорания (массовая)  $v_m$**  – количество вещества, которое выгорает в единицу времени ( $\text{кг/с}$ ); массовая скорость выгорания зависит прежде всего от природы вещества, интенсивности газообмена, времени развития пожара.

**Скорость выгорания (приведенная массовая)  $v'_{пр^M}$**  – масса горючего вещества или материала, выгорающая в единицу времени с единицы площади поверхности горения ( $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ ).

**Скорость выгорания (удельная массовая)  $v' m$**  – количество вещества, которое выгорает в единицу времени с единицы площади пожара ( $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ ).

**Стехиометрический состав горючей смеси** – состав смеси, в которой окислителя ровно столько, сколько необходимо для полного окисления топлива без остатка избыточного кислорода.

**Теплота пожара** – количество тепла, выделяющееся в зоне горения в единицу времени ( $\text{кВт}$ ).

**Удельная пожарная нагрузка  $P_{пож}$**  – количество теплоты, которое может выделиться с единицы площади, занимаемой горящими материалами при пожаре ( $\text{МДж}/\text{м}^2$ ).

**Удельную горючую нагрузку** измеряют как массу всех горючих и трудногорючих материалов, которая приходится на единицу занимаемой ими площади ( $\text{кг}/\text{м}^2$ ).

**Удельный расход** – количество огнетушащего вещества (л, кг), израсходованное за время тушения в расчете либо на 1 м<sup>2</sup> площади пожара, либо на 1 м<sup>3</sup> объема помещения, либо на 1 м<sup>3</sup> фонтанирующего газа (л/м<sup>2</sup>, кг/м<sup>2</sup>, л/м<sup>3</sup>, кг/м<sup>3</sup>).

**Фронт пожара** – часть периметра пожара, на которой распространение пожара происходит наиболее интенсивно.

## **ПРИЛОЖЕНИЕ**

**Периодическая система химических элементов Д.И. Менделеева**

Период	Ряд	Г Р У П П Ы Э Л Е М Е Н Т О В												
		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII					
I	1	(H)							<b>H</b> <sup>1</sup> 1,00797 Водород	<b>He</b> <sup>2</sup> 4,0026 Гелий	<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <span>Обозначение элемента</span> <span>Атомный номер</span> </div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin: 5px auto; width: fit-content;"> <b>Li</b><sup>3</sup> 6,939 Литий                 </div> <div style="text-align: right; margin-top: 5px;">Относительная атомная масса</div>			
II	2	<b>Li</b> <sup>3</sup> 6,939 Литий	<b>Be</b> <sup>4</sup> 9,0122 Бериллий	<b>B</b> <sup>5</sup> 10,811 Бор	<b>C</b> <sup>6</sup> 12,01115 Углерод	<b>N</b> <sup>7</sup> 14,0067 Азот	<b>O</b> <sup>8</sup> 15,9994 Кислород	<b>F</b> <sup>9</sup> 18,9984 Фтор	<b>Ne</b> <sup>10</sup> 20,179 Неон					
III	3	<b>Na</b> <sup>11</sup> 22,9898 Натрий	<b>Mg</b> <sup>12</sup> 24,305 Магний	<b>Al</b> <sup>13</sup> 26,9815 Алюминий	<b>Si</b> <sup>14</sup> 28,086 Кремний	<b>P</b> <sup>15</sup> 30,9738 Фосфор	<b>S</b> <sup>16</sup> 32,064 Сера	<b>Cl</b> <sup>17</sup> 35,453 Хлор	<b>Ar</b> <sup>18</sup> 39,948 Аргон					
IV	4	<b>K</b> <sup>19</sup> 39,102 Калий	<b>Ca</b> <sup>20</sup> 40,08 Кальций	21 <b>Sc</b> 44,956 Скандий	22 <b>Ti</b> 47,90 Титан	23 <b>V</b> 50,942 Ванадий	24 <b>Cr</b> 51,996 Хром	25 <b>Mn</b> 54,9380 Марганец	26 <b>Fe</b> 55,847 Железо	27 <b>Co</b> 58,9330 Кобальт	28 <b>Ni</b> 58,71 Никель			
	5	29 <b>Cu</b> 63,546 Медь	30 <b>Zn</b> 65,37 Цинк	31 <b>Ga</b> 69,72 Галлий	32 <b>Ge</b> 72,59 Германий	33 <b>As</b> 74,9216 Мышьяк	34 <b>Se</b> 78,96 Селен	35 <b>Br</b> 79,904 Бром	36 <b>Kr</b> 83,80 Криптон					
V	6	<b>Rb</b> <sup>37</sup> 85,47 Рубидий	<b>Sr</b> <sup>38</sup> 87,62 Стронций	39 <b>Y</b> 88,905 Иттрий	40 <b>Zr</b> 91,22 Цирконий	41 <b>Nb</b> 92,906 Ниобий	42 <b>Mo</b> 95,94 Молибден	43 <b>Tc</b> [99] Технеций	44 <b>Ru</b> 101,07 Рутений	45 <b>Rh</b> 102,905 Родий	46 <b>Pd</b> 106,4 Палладий			
	7	47 <b>Ag</b> 107,868 Серебро	48 <b>Cd</b> 112,40 Кадмий	49 <b>In</b> 114,82 Индий	50 <b>Sn</b> 118,69 Олово	51 <b>Sb</b> 121,75 Сурьма	52 <b>Te</b> 127,60 Теллур	53 <b>I</b> 126,9044 Иод	54 <b>Xe</b> 131,30 Ксенон					
VI	8	<b>Cs</b> <sup>55</sup> 132,905 Цезий	<b>Ba</b> <sup>56</sup> 137,34 Барий	57 <b>La*</b> 138,91 Лантан	72 <b>Hf</b> 178,49 Гафний	73 <b>Ta</b> 180,948 Тантал	74 <b>W</b> 183,85 Вольфрам	75 <b>Re</b> 186,2 Рений	76 <b>Os</b> 190,2 Осмий	77 <b>Ir</b> 192,2 Иридий	78 <b>Pt</b> 195,09 Платина			
	9	79 <b>Au</b> 196,967 Золото	80 <b>Hg</b> 200,59 Ртуть	81 <b>Tl</b> 204,37 Таллий	82 <b>Pb</b> 207,19 Свинец	83 <b>Bi</b> 208,980 Висмут	84 <b>Po</b> [210]* Полоний	85 <b>At</b> [210] Астат	86 <b>Rn</b> [222] Радон					
VII	10	<b>Fr</b> <sup>87</sup> [223] Франций	<b>Ra</b> <sup>88</sup> [226] Радий	89 <b>Ac**</b> [227] Актиний	104 <b>Rf</b> [261] Резерфордий	105 <b>Db</b> [262] Дубний	106 <b>Sg</b> [263] Сиборгий	107 <b>Bh</b> [262] Борий	108 <b>Hs</b> [265] Хассий	109 <b>Mt</b> [266] Мейтнерий	110			
Лантаноиды*	58 <b>Ce</b> 140,12 Церий	59 <b>Pr</b> 140,907 Празеодим	60 <b>Nd</b> 144,24 Неодим	61 <b>Pm</b> [147]* Прометий	62 <b>Sm</b> 150,35 Самарий	63 <b>Eu</b> 151,96 Европий	64 <b>Gd</b> 157,25 Гадолиний	65 <b>Tb</b> 158,924 Тербий	66 <b>Dy</b> 162,50 Диспрозий	67 <b>Ho</b> 164,930 Гольмий	68 <b>Er</b> 167,26 Эрбий	69 <b>Tm</b> 168,934 Тулий	70 <b>Yb</b> 173,04 Иттербий	71 <b>Lu</b> 174,97 Лютеций
Актиноиды**	90 <b>Th</b> 232,038 Торий	91 <b>Pa</b> [231] Протактиний	92 <b>U</b> 238,03 Уран	93 <b>Np</b> [237] Нептуний	94 <b>Pu</b> [244] Плутоний	95 <b>Am</b> [243] Америций	96 <b>Cm</b> [247] Кюрий	97 <b>Bk</b> [247] Берклий	98 <b>Cf</b> [252]* Калифорний	99 <b>Es</b> [254] Эйнштейний	100 <b>Fm</b> [257] Фермий	101 <b>Md</b> [257] Менделевий	102 <b>No</b> [255] Нобелий	103 <b>Lr</b> [256] Лоуренсий



## ПЕРЕЧЕНЬ РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

### *а) основная литература:*

1. Физико-химические основы развития и тушения пожаров.: учебное пособие/ Под ред. В. Ф. Маркова; МЧС России. - Екатеринбург: УРО РАН, 2010. - 274 с. (инв. №2120у)

2. Физико-химические основы развития и тушения пожаров: лабораторный практикум/ Л. Н. Андреева [и др.]. Химки: АГЗ МЧС России, 2012. - 40 с. (инв. №2681к)

3. Сборник задач по курсу "Физико-химические основы развития и тушения пожаров": учебное пособие/ Л. Н. Андреева, Е. П. Анпенова, Е. В. Новоселова ; под общ. ред. Н. П. Валуева. Химки: АГЗ МЧС России, 2017. - 68 с. (инв. №3597к)

4. Тимкин А.В. Основы пожарной безопасности: учебное пособие. - Москва/Берлин: Директ-Медиа, 2015 г, с. 40-61, 206-244. То же [Электронный ресурс] URL: <http://biblioclub.ru/index/php?page=book&id=463536>

### *б) дополнительная литература:*

5. ГОСТ 12.1.044-89. ССБТ. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов. Номенклатура показателей и методов их определения. [Электронный ресурс] URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200004802>

6. Пучков В.А. Пожарная безопасность: учебник в 2-х частях. М.: АГПС МЧС России, 2017. 418 с.

7. Справочник инженера пожарной охраны: учебно-практическое пособие. – Москва: Инфа-Инженерия, 2010 г, с. 73-120. [Электронный ресурс] URL: <http://biblioclub.ru/index/php?page=book&id=444448>

8. Андросов А.С. Теоретический расчет основных параметров горения и тушения пожара газового фонтана: курсовая работа по дисциплине «Физико-химические основы развития и тушения пожаров».-М.: Академия ГПС МЧС России, 2012.-13с.

9. Бобков С.А. Физико-химические основы развития и тушения пожаров: учеб. пособие / С.А. Бобков, А.В. Бабурин, П.В. Комраков. - М.: Академия ГПС МЧС России, 2014. - 210 с.

10. Бобков С.А. Примеры и задачи по курсу «Физико-химические основы развития и тушения пожаров»: Учеб. Пособие. - М.: Академия ГПС МЧС России, 2010. - 98 с.

11. Андросов А.С., Салеев Е.П. Примеры и задачи по курсу «Теория горения и взрыва»: - М.: Академия ГПС МЧС России, 2008. - 80 с.

12. Андросов А.С. Теория горения и взрыва: учебник / А.С. Андросов, И.Р. Бегишев, Е.П. Салеев. - М.: Академия ГПС МЧС России, 2015. - 248 с.

*в) ресурсы, предоставляемые электронной образовательной средой АГЗ МЧС России и сетью Интернет:*

1. Учебный курс АГЗ МЧС России по дисциплине «Физико-химические основы развития и тушения пожаров» [Электронный ресурс]. URL: <http://donew.amchs.ru> (доступ по паролю обучающегося)

2. Университетская библиотека онлайн [Электронный ресурс]. URL: <https://biblioclub.ru>

3. Научная электронная библиотека eLIBRARY.RU [Электронный ресурс]. URL: <https://elibrary.ru>

4. Электронная библиотека издательства «Юрайт» [Электронный ресурс]. URL: <http://urait.ru>

5. Сайт «Информация по гражданской обороне, предупреждению и ликвидации чрезвычайных ситуаций» [Электронный ресурс]. URL: <http://www.gochs.info>

6. Электронный фонд правовой и нормативно-технической документации [Электронный ресурс]. URL: <http://www.docs.cntd.ru>

7. Некоммерческая интернет-версия Консультант плюс [Электронный ресурс]. URL: <http://www.consultant.ru>