

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Методические указания

по выполнению практических работ
по дисциплине «ТЕОРИЯ ГОРЕНИЯ И ВЗРЫВА»
для студентов направления подготовки
20.03.01 «Техносферная безопасность»
(направленность (профиль): «Пожарная безопасность»)

Ставрополь
2026

Введение

Важную роль в деле подготовки бакалавров техносферной безопасности играет дисциплина «Теория горения и взрыва». В ее задачу входит: дать современные научные представления об основных понятиях и определениях, характеризующих пожарную опасность веществ и материалов, закономерностях процессов возникновения и развития устойчивого горения, методики оценки пожаровзрывоопасности среды.

Глубокое изучение процесса горения является необходимым условием качественной, фундаментальной подготовки инженерных кадров для МЧС России. Однако глубокое изучение такого сложного и многофакторного явления, как процесс горения, практически невозможно без выполнения решения задач по расчету параметров пожарной опасности веществ и материалов.

Овладение методами расчета параметров пожарной опасности веществ необходимо прежде всего для практической деятельности, а так же для более углубленного понимания закономерностей процессов воспламенения, распространения горения и его прекращения. На каждое практическое занятие отводится по четыре часа (две пары).

СОДЕРЖАНИЕ

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ 1, 2	
Материальный и тепловой балансы процессов горения. Расчёт количества воздуха, необходимого для горения веществ	4
ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ 3,4	
Расчёт объёма и состава продуктов горения	10
ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ 5	
Составление материального баланса	12
ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ 6, 8	
Расчет нижних концентрационных пределов распространения пламени (воспламенения)	14
ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ 7, 9	
Расчет верхних концентрационных пределов распространения пламени (воспламенения)	19
ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ 10, 11	
Температурные показатели пожарной опасности жидкостей, аэрогелей и аэрозолей	23
ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ 12	
Расчет температурных пределов распространения пламени (воспламенения)	27
ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ 13, 14	
Расчет температуры вспышки и воспламенения	30
ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ 15	
Расчет стандартной температуры самовоспламенения	35
ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ 16	
Потенциал горючести	39
ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ 17	
Расчет температуры и давления взрыва парогазовоздушных систем	43

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ 1, 2

Материальный и тепловой балансы процессов горения. Расчёт количества воздуха, необходимого для горения веществ

1. Целью практического занятия является изучение основ материального и теплового баланса процессов горения. Научиться проводить расчеты по определению количества воздуха, необходимого для горения веществ.

2. В результате освоения темы практического занятия студенты приобретают следующие умения и навыки, формируемые компетенции: способен определять круг задач в рамках поставленной цели и выбирать оптимальные способы их решения, исходя из действующих правовых норм, имеющихся ресурсов и ограничений (УК-2); способен учитывать современные тенденции развития техники и технологий в области техносферной безопасности, измерительной и вычислительной техники, информационных технологий при решении типовых задач в области профессиональной деятельности, связанной с защитой окружающей среды и обеспечением безопасности человека (ОПК-1).

3. Актуальность темы: овладение методами расчета параметров пожарной опасности веществ необходимо для практической деятельности студентов.

4. Теоретическая часть

Горение – это важнейший из применяемых человеком физико-химических процессов. Роль огня в возникновении и развитии цивилизации необычайно велика. Своеобразное отражение этого факта – миф о Прометее или гениальные догадки философов древности о том, что «огонь» является одним из немногих основных «элементов природы», в настоящее время можно сказать состояний вещества. До сих пор, несмотря на интенсивное развитие атомной, гидро-, гелио- и геотермальной энергетики, за счёт сжигания топлива производится основная доля энергии, обеспечивающей потребности человеческого общества. Все остальные источники, включая продукты питания, дают человечеству менее десяти процентов необходимой ему энергии.

Что же такое горение, роль которого в жизни человеческого общества так велика?

Горение – это режим протекания экзотермических химических реакций, характеризующийся значительной скоростью химического превращения, излучением тепла и света и способностью реакции к прохождению в самоподдерживающемся или самораспространяющемся режиме.

Материальный баланс процесса горения соотношение (равенство) между количеством веществ, которые вступают в реакцию горения, и количеством веществ (продуктов горения), которые получаются вследствие этой реакции.

Расход воздуха на горение

При горении происходит взаимодействие между молекулами горючего вещества и окислителя, при этом получаются продукты сгорания.

Горючее вещество + Окислитель = Продукты сгорания

Как правило, окислителем при горении выступает кислород воздуха. Схематично химическую реакцию сгорания одного моля вещества в воздухе можно представить уравнением:

$$ГВ + \beta(O_2 + 3,76 N_2) = \sum n_i \cdot ПГ_i + \beta \cdot 3,76 N_2,$$

в котором символами $ГВ$, O_2 , N_2 , $ПГ_i$ обозначены молекулы, соответственно горючего вещества, кислорода, азота и i -го продукта горения; n_i – количество молекул i -го продукта горения, приходящееся на одну молекулу горючего; β – стехиометрический коэффициент реакции горения.

Это лишь суммарная реакция, но она достаточна для проведения практических расчетов и является обобщенной записью материального баланса реакции горения.

Минимальный объем воздуха, который необходим для полного сгорания единицы количества горючего вещества, называется **удельным теоретическим объемом воздуха** и обозначается $V^0_{\text{в}}$. В зависимости от единиц измерения количества горючего вещества (1 моль, 1 м³, 1 кг) удельный объем измеряется в м³/моль, м³/м³, м³/кг.

Действительное количество воздуха, который поступает в зону горения, отличается от теоретического. Соответствующий объем называется удельным действительным объемом воздуха и обозначается $v_{\text{в}}$. Разность между количеством воздуха, который идет на горение и теоретически необходимым, называется избытком воздуха. Для характеристики процесса горения используют понятие коэффициент избытка воздуха – $\alpha_{\text{в}}$, который показывает, во сколько раз количество воздуха, который действительно поступает в зону горения, отличается от теоретически необходимого количества для полного сгорания единицы количества горючего вещества.

Таким образом, действительный удельный объем воздуха равняется:

$$V_{\text{в}} = v^0_{\text{в}} \cdot \alpha_{\text{в}}.$$

Часть воздуха, неизрасходованная на горение, переходит в продукты горения.

В случае кинетического горения, при $\alpha_{\text{в}} = 1$, смесь горючего с воздухом является стехиометрической. Величина тепловыделения на единицу продуктов сгорания при этом максимальна, вследствие чего температура в зоне горения также максимальна.

При $\alpha_{\text{в}} < 1$ в смеси недостаток окислителя и избыток горючего вещества. Такая смесь называется богатой. Характерной особенностью процесса горения в этом случае является образование продуктов неполного сгорания.

При $\alpha_{\text{в}} > 1$ смесь называется **бедной**. В ней недостаток горючего вещества и избыток окислителя. При этом продукты горения включают в себя избыток воздуха.

Продукты горения – это газообразные, твердые и жидкие вещества, образующиеся в процессе горения.

Состав продуктов горения зависит от состава горючего вещества и условий протекания реакции горения. Продукты горения образуют дым.

Дым – дисперсная система, состоящая из твердых и жидких частиц (дисперсной фазы), находящихся в газовой дисперсионной среде.

Свойства дыма характеризуются следующими параметрами:

– **Концентрация дыма** – это масса продуктов горения, находящихся в единице объема. В зоне задымления концентрация продуктов горения находится в интервале от $1 \cdot 10^{-4}$ до $5 \cdot 10^{-3}$ кг/м³.

– **Наличие конденсированной фазы** обуславливает непрозрачность дыма. Степень снижения прозрачности зависит от концентрации, размера и природы частиц дисперсной фазы. Параметром, характеризующим оптические свойства дыма, является плотность задымления.

– **Плотность задымления** – отношение интенсивности света I_n , прошедшего через слой дыма, к интенсивности падающего света I_j .

$$D_d = I_n / I_j.$$

– **Содержание кислорода**. В обычных условиях содержание кислорода в воздухе составляет 21% (объемный). Снижение концентрации кислорода в воздухе приводит к кислородному голоданию людей. Так, при снижении концентрации ниже 16%, работа без индивидуальных средств защиты органов дыхания невозможна.

– **Токсичность продуктов горения** – способность продуктов горения вызвать отравления людей, находящихся без индивидуальных средств защиты органов дыхания.

– **Температура дыма**. Температура продуктов горения непосредственно возле зоны горения может достигать 1000 °С, но в помещениях температура дыма обычно

существенно ниже. Основным фактором, влияющим на температуру дыма, являются условия газообмена. При увеличении коэффициента избытка воздуха температура продуктов горения снижается. Опасной для людей, считается температура выше 70 °С. Продолжительное пребывание людей при такой температуре, связано с риском для жизни из-за перегрева организма.

Стойкость дыма определяют такие параметры дымовых частиц, как:

- маленькая масса;
- высокая удельная поверхность;
- броуновское движение, в котором они находятся;
- наличие на их поверхности электрического заряда.

Продукты неполного сгорания, образующиеся при горении веществ и материалов в закрытых помещениях, при поступлении свежего воздуха могут образовывать **горючую смесь**. Горение при этом происходит в кинетическом режиме (взрыв).

Теоретической базой для расчётов материального и теплового балансов являются фундаментальные законы сохранения веществ и энергии.

Для практических расчётов принимают, что состав воздуха состоит из 21 % кислорода и 79 % азота. Таким образом, объёмное соотношение азота и кислорода в воздухе составит:

$$\frac{\varphi_{N_2}}{\varphi_{O_2}} = \frac{79}{21} = 3.76 \quad (1.1)$$

где $\varphi_{N_2}, \varphi_{O_2}$ – соответственно объёмное (% об.) содержание азота и кислорода в окислительной среде.

Следовательно, на 1 м³ (кмоль) кислорода в воздухе приходится 3,76 м³ (кмоль) азота.

Весовое соотношение азота и кислорода в воздухе составляет 23,3% O₂ и 76,7% N₂. Его можно определить, исходя из:

$$\frac{\varphi_{N_2} M_{N_2}}{\varphi_{O_2} M_{O_2}} = \frac{79 \cdot 28}{21 \cdot 32} = 3.29 \quad (1.2)$$

где M_{O_2}, M_{N_2} – молекулярные массы соотношение азота и кислорода.

Для удобства расчётов горючие вещества разделяют на три типа (табл.1.1):

- индивидуальные химические соединения (метан, уксусная кислота и т.п.),
- вещества сложного состава (древесина, торф, сланцы, нефть, и т.п.),
- смесь газов (генераторный газ и т.п.).

Таблица 1.1 – Типы горючих веществ

Тип горючего вещества	Расчётные формулы	Размерность
Индивидуальное вещество	$V_B^0 = \frac{n_{O_2} + n_{N_2}}{n_{\Gamma}} \quad (1.3,a)$	$\frac{\text{кмоль}}{\text{кмоль}}; \frac{\text{м}^3}{\text{м}^3}$
	$V_B^0 = \frac{(n_{O_2} + n_{N_2}) \cdot V_0}{n_{\Gamma} M} \quad (1.3,б)$	$\frac{\text{м}^3}{\text{м}^3}$
Вещество сложного состава	$V_B^0 = 0.269 \left(\frac{C}{3} + P + \frac{S - O}{8} \right) \quad (1.4)$	$\frac{\text{м}^3}{\text{кг}}$
Смесь газов	$V_B^0 = \frac{\sum \varphi_{\Gamma} n_{O_{2i}} - \varphi_{O_2}}{21} \quad (1.5)$	$\frac{\text{м}^3}{\text{м}^3}; \frac{\text{кмоль}}{\text{кмоль}}$

Здесь V_B^0 – теоретическое количество воздуха;

n_G, n_{O_2}, n_{N_2} – количество горючего, кислорода и азота, получаемого из уравнения химической реакции горения, кмоль;

M – молекулярная масса горючего;

V_0 – объем 1 кмоль газа при нормальных условиях (22,4 м³);

C, H, S, O – весовое содержание соответствующих элементов в составе горючего, %

φ_{Gi} – концентрация i -го горючего компонента, % об.;

φ_{O_2} – концентрация кислорода в составе горючего газа, % об.;

$n_{O_{2i}}$ – количество кислорода, необходимое для окисления одного кмоль i -го горючего компонента, кмоль.

Для определения объема воздуха при горении в условиях, отличных от нормальных, пользуются уравнением состояния идеальных газов

$$\frac{p_0 V_0}{T_0} = \frac{p_1 V_1}{T_1}, \quad (1.6)$$

где p_0 – нормальное давление, Па;

T_0 – нормальная температура, К;

V_0 – объем воздуха при нормальных условиях, м³;

p_1 – заданное давление, Па;

T_1 – заданная температура, К;

V_1 – заданный объем газа, м³.

Практический объем воздуха V_B , поступивший в зону горения. Отношение практического объема воздуха к теоретическому называется коэффициентом избытка воздуха α :

$$\alpha = \frac{V_B}{V_B^0} \quad (1.7)$$

Разность между практическим и теоретическим объемами воздуха называется избытком воздуха ΔV_B :

$$\Delta V_B = V_B - V_B^0 \quad (1.8)$$

Из уравнений (1.7) и (1.8) следует, что

$$\Delta V_B = V_B^0 (\alpha - 1) \quad (1.9)$$

Если известно содержание кислорода в продуктах горения, то коэффициент избытка воздуха определяется по формуле:

$$\alpha = 1 + \frac{\varphi_{O_2} V_{n_2}}{V_B^0 (21 - \varphi_{O_2})} \quad (1.10)$$

где φ_{O_2} – содержание кислорода в продуктах горения, % об.;

V_B^0 – теоретический объем продуктов горения.

(Продукт горения пг).

Для веществ у которых объем продуктов горения равен объему исходного воздуха (например, углерод), формула (1.10) упрощается:

$$\alpha = \frac{21}{21 - \varphi_{O_2}}. \quad (1.11)$$

В случае образования продуктов неполного сгорания (CO , H_2 , CH_4 , и др.) формула (1.11) приобретает вид:

$$\alpha = \frac{21}{21 - \varphi_{O_2} + 0,5\varphi_{CO_2} + 0,5\varphi_{H_2} + 2\varphi_{CH_4}} \quad (1.12)$$

где $\varphi_{O_2}, \varphi_{CO_2}, \varphi_{H_2}, \varphi_{CH_4}$ – содержание соответствующих веществ в продуктах горения, % об.

Если содержание кислорода в окислительной среде отличается от содержания его в воздухе, то формулу (1.12) можно записать в виде:

$$\alpha = 1 + \frac{\varphi_{O_2} V_{n_2}}{V_B^0 (\varphi_{O_2}^0 - \varphi_{O_2})} \quad (1.13)$$

и соответственно формулу (1.13)

$$\alpha = \frac{21}{\varphi_{O_2}^0 - \varphi_{O_2}} \quad (1.14)$$

где $\varphi_{O_2}^0$ – исходное содержание кислорода в окислительной среде, % об.

Часто в пожарно-технических расчётах требуется определить массу воздуха, пошедшего на горение,

$$M_B = V_B \rho_B \quad (1.15)$$

где ρ_B – плотность воздуха, кг/м³.

Очевидно, что

$$\rho = \frac{\varphi_{N_2} \mu_{N_2} + \varphi_{O_2} \mu_{O_2}}{V_0} \cdot \frac{P_1 T_0}{P_0 T_1} \quad (1.16)$$

После подстановки постоянных значений в формулу (1.16) получим

$$\rho_B = 3,47 \cdot 10^{-3} \frac{P}{T} \quad (1.17)$$

где P – атмосферное давление, Па;

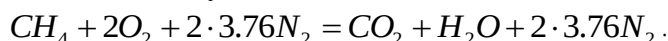
T – температура воздуха, К.

Пример

Определить теоретическую массу и объём воздуха, необходимого для сгорания 1 м³ метана при нормальных условиях.

Решение:

Горючее вещество является индивидуальным химическим соединением, поэтому для расчёта его объёма надо пользоваться формулой (1.3,а), запишем уравнение химической реакции горения CH_4 в воздухе



Из уравнения находим $n_{O_2} = 2; n_{N_2} = 2 \cdot 3.76 = 7.52; n_{CH_4} = 1$, тогда

$$V_B^0 = \frac{2 + 7.52}{1} = 9.52 \text{ м}^3/\text{м}^3 \text{ или кмоль/кмоль}$$

По формуле (1.15) с учётом уравнения (1.16) рассчитаем массу воздуха

$$M_B = 9.52 \frac{0.76 \cdot 28 + 0.21 \cdot 32}{22.4} = 9.52 \cdot 1.28 = 12.2 \text{ кг/м}^3.$$

5. Вопросы и задания

Самостоятельно решить задачи, используя в помощь пример, приведенный выше.

Задача 1. Определить теоретический объём воздуха, необходимого для горения 1 кг бензола.

Задача 2. Определить объём и массу воздуха, необходимого для горения 1 кг органической массы состава $C - 60\%$, $H - 5\%$, $O - 25\%$, $N - 5\%$, $W - 5\%$ (влажность), если коэффициент избытка воздуха $\alpha = 2,5$; температура воздуха 305 К, давление 99500 Па.

Задача 3. Определить объём воздуха, необходимого для горения 5 м смеси газов, состоящих из 20% – CH_4 ; 40% – C_2H_2 ; 10% – CO ; 5% – N_2 и 25% – O_2 , если коэффициент избытка воздуха 1,8.

Задача 4. Определить коэффициент избытка воздуха при горении уксусной кислоты, если на горение 1 кг поступило 3 м³ воздуха.

Задача 5. Определить объём воздуха, пошедшего на окисление 1 м³ аммиака, если в продуктах горения содержание кислорода составило 18%.

Задача 6. Определить объём окислительной среды, состоящей из 60% O_2 и 40% N_2 , необходимый для горения 1 кг изоприлового спирта, если её температура равна 295 К, давление 62,0 кПа.

Задача 7. Определить массу динитротолуола, сгоревшего в герметичном объёме 100м³, если содержание кислорода в продуктах горения составило 12%.

6. Список литературы, рекомендуемый к использованию по данной теме

Основная литература

1. Кукин, П. П. Теория горения и взрыва : учебное пособие / П. П. Кукин, В. В. Юшин, С. Г. Емельянов ; Юго-Западный гос. ун-т, Рос. гос. технолог. ун-т им. К. Э. Циолковского (МАТИ-РГТУ). – М. : Юрайт, 2015. – 435 с. : ил., табл. – (Бакалавр). – Гриф: Доп. УМО. – Библиогр.: с. 433-435. – ISBN 978-5-9916-2722-1

2. Теория горения и взрывов [Электронный ресурс] : практикум / . — Электрон. текстовые данные. — Новосибирск: Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики, 2015. — 97 с. — 2227-8397. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/55503.html>

Дополнительная литература

1. Девисилов, В. А. Теория горения и взрыва : практикум : учеб. пособие для вузов / В.А. Девисилов, Т.И. Дроздова, С.С. Тимофеева. – Москва : ФОРУМ, 2012. – 351 с. : ил. ; 22. – (Высшее образование). – Гриф: Рек. УМО. – Библиогр.: с. 286-287. – ISBN 978-5-91134-555-6

2. Горев В.А. Теория горения и взрыва [Электронный ресурс] : учебное пособие / В.А. Горев. — Электрон. текстовые данные. — М. : Московский государственный строительный университет, ЭБС АСВ, 2010. — 200 с. — 2227-8397. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/16330.html>

3. Матерова С.И. Химия процессов горения [Электронный ресурс] : учебное пособие / С.И. Матерова. — Электрон. текстовые данные. — Железногорск: Сибирская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, 2017. — 63 с. — 2227-8397. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/66930.html>

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ 3, 4

Расчёт объёма и состава продуктов горения

1. Целью практического занятия является научиться проводить расчеты объема и состава продуктов горения.

2. В результате освоения темы практического занятия студенты приобретают

следующие умения и навыки, формируемые компетенции: способен определять круг задач в рамках поставленной цели и выбирать оптимальные способы их решения, исходя из действующих правовых норм, имеющихся ресурсов и ограничений (УК-2); способен учитывать современные тенденции развития техники и технологий в области техносферной безопасности, измерительной и вычислительной техники, информационных технологий при решении типовых задач в области профессиональной деятельности, связанной с защитой окружающей среды и обеспечением безопасности человека (ОПК-1)..

3. Актуальность темы: овладение методами расчета параметров пожарной опасности веществ необходимо для практической деятельности студентов.

4. Теоретическая часть

С целью упрощения расчёта все горючие вещества разделены на три типа: индивидуальные, сложные, смеси горючих газов (табл. 3.1).

Здесь $V_{\text{пр}}^0$ – теоретический объём продуктов горения; $n_{\text{пр}i}$ – количество i -го продукта горения в уравнении реакции, кмоль; $n_{\text{г}}$ – количество горючего, кмоль; V^0 – объём 1 кмоль газа; M – молекулярная масса горючего; $V_{\text{пр}i}$ – объём i -го продукта реакции; C, H, S, O, N – содержание соответствующих элементов (углерода, водорода, серы, кислорода и азота) в горючем веществе, % вес; $\varphi_{\text{г}i}$ – содержание i -го горючего компонента в газовой смеси, %об.; $n_{\text{пр}i}$ – содержание i -го негорючего компонента в составе газовой смеси, % об.

Таблица 3.1 – Типы горючих веществ

Тип горючего вещества	Расчетные формулы	Размерность
Индивидуальное вещество	$V_{\text{пр}}^0 = \frac{\sum n_{\text{пр}i}}{n_{\text{г}}} \quad (3.1)$ $V^0 = \frac{V_0 \sum n_{\text{пр}i}}{n_{\text{г}} M} \quad (3.2)$	$\frac{\text{м}^3}{\text{м}^3}; \frac{\text{кмоль}}{\text{кмоль}}$ $\frac{\text{м}^3}{\text{кг}}$
Вещество сложного состава	$V_{\text{CO}_2} = 1.86 \frac{C}{100} \quad (3.3)$ $V_{\text{H}_2\text{O}} = 11.2 \frac{H}{100} + 1.24 \frac{W}{100} \quad (3.4)$ $V_{\text{SO}_2} = 0.7 \frac{S}{100} \quad (3.5)$ $V_{\text{N}_2} = \frac{1}{100} \left[7C + 21 \left(H - \frac{O}{8} \right) + 2.63S + 0.8N \right] \quad (3.6)$	$\frac{\text{м}^3}{\text{кг}}; \frac{\text{кмоль}}{\text{кг}}$
Смесь газов	$V_{\text{пр}}^0 = \sum V_{\text{пр}i} \quad (3.7)$ $V_{\text{пр}i} = \frac{1}{100} \left[\frac{\sum n_{\text{пр}i} \varphi_{\text{г}i}}{n_{\text{г}}} + \sum \varphi_{\text{н}di} \right] \quad (3.8)$	$\frac{\text{м}^3}{\text{м}^3}; \frac{\text{кмоль}}{\text{кмоль}}$

Практический (полный) объём продуктов горения состоит из теоретического объёма продуктов горения и избытка воздуха

$$V_{\text{пр}} = V_{\text{пр}}^0 + \Delta V_{\text{в}} \quad (3.1)$$

или

$$V_{\text{пр}} = V_{\text{пр}}^0 + V_B^0(\alpha - 1) \quad (3.2)$$

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

$$\varphi_{\text{пр}i} = \frac{V_{\text{пр}i}}{\sum V_{\text{пр}i}} 100 \quad (3.3)$$

где $\varphi_{\text{пр}i}$ – содержание i -го компонента в продуктах сгорания, % об.;

$V_{\text{пр}i}$ – объём i -го компонента, м³, кмоль;

$\sum V_{\text{пр}i}$ – полный объём продуктов горения, м³, кмоль.

При горении в избытке воздуха в продуктах горения содержится кислород и азот

$$V_{O_2} = 0.21 \Delta V_B \quad (3.4)$$

$$V_{N_2} = V_{N_2}^0 + 0.79 \Delta V_B \quad (3.5)$$

где $V_{N_2}^0$ – теоретический объём азота в продуктах горения, м³, кмоль.

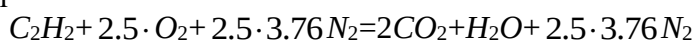
$$V_{N_2}^0 = 0.79 V_B^0 \quad (3.6)$$

Пример

Какое количество продуктов горения выделится при сгорании 1 м³ ацетилена в воздухе, если температура горения составила 1450 К.

Решение:

Горючее – индивидуальное химическое соединение. Запишем уравнение химической реакции горения



Объём продуктов горения при нормальных условиях

$$V_{\text{пр}}^0 = \frac{2 + 1 + 2.5 \cdot 3.76}{1} = 12.4 \text{ м}^3/\text{м}^3$$

Объём продуктов горения при 1450 К

$$V_{\text{пр}(pT)}^0 = \frac{12.4 \cdot 1450}{273} = 62.9 \text{ м}^3/\text{м}^3$$

5. Вопросы и задания

Самостоятельно решить задачи, используя в помощь пример, приведенный выше.

Задача 1. Определить объём продуктов горения при сгорании 1 кг фенола, если температура горения 1200 К, давление 95000 Па, коэффициент избытка воздуха 1,5.

Задача 2. Определить объём продуктов горения при сгорании 1 кг органической массы состава: С – 55%, О – 13%, Н – 5%, S – 7%, N – 3%, W 17%, если температура горения 1170 К, коэффициент избытка воздуха – 1.3.

Задача 3. Рассчитать объём продуктов горения при сгорании 1 м³ газовой смеси, состоящей из C₃H₆ – 70%, C₃H₈ – 10%, CO₂ – 5%, O₂ – 15%, если температура горения 1300 К, коэффициент избытка воздуха – 2,8. Температура окружающей среды 293 К.

Задача 4. Определить состав продуктов горения метилэтилкетона.

Задача 5. Определить объём и состав продуктов горения 1 кг минерального масла состава: С – 85%, Н – 15%, если температура горения 1450 К, коэффициент избытка воздуха – 1,9.

Задача 6. Определить количество сгоревшего ацетона, кг, если объём выделившийся двуокиси углерода, приведённый к нормальным условиям, составил 50 м³.

Задача 7. Определить количество сгоревшей органической массы состава С – 58%,

$O - 22\%$, $H - 8\%$, $N - 2\%$, $W - 10\%$ в помещении объемом 350 м^3 , если содержание двуокиси углерода составило 5% .

Задача 8. Определить время, когда содержание двуокиси углерода в помещении объемом 480 м^3 в результате горения древесины ($C - 45\%$, $H - 50\%$, $O - 42\%$, $W - 8\%$) составило 8% , если удельная массовая скорость выгорания древесины $0,008 \text{ кг}/(\text{м}^2\text{с})$, а поверхность горения 38 м^2 . При решении газообмен с окружающей средой не учитывать, разбавлением в результате выделения продуктов горения пренебречь.

6. Список литературы, рекомендуемый к использованию по данной теме

Основная литература

1. Кукин, П. П. Теория горения и взрыва : учебное пособие / П. П. Кукин, В. В. Юшин, С. Г. Емельянов ; Юго-Западный гос. ун-т, Рос. гос. технолог. ун-т им. К. Э. Циолковского (МАТИ-РГТУ). – М. : Юрайт, 2015. – 435 с. : ил., табл. – (Бакалавр). – Гриф: Доп. УМО. – Библиогр.: с. 433-435. – ISBN 978-5-9916-2722-1
2. Теория горения и взрывов [Электронный ресурс] : практикум / . — Электрон. текстовые данные. — Новосибирск: Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики, 2015. — 97 с. — 2227-8397. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/55503.html>

Дополнительная литература

1. Девисилов, В. А. Теория горения и взрыва : практикум : учеб. пособие для вузов / В.А. Девисилов, Т.И. Дроздова, С.С. Тимофеева. – Москва : ФОРУМ, 2012. – 351 с. : ил. ; 22. – (Высшее образование). – Гриф: Рек. УМО. – Библиогр.: с. 286-287. – ISBN 978-5-91134-555-6
2. Горев В.А. Теория горения и взрыва [Электронный ресурс] : учебное пособие / В.А. Горев. — Электрон. текстовые данные. — М. : Московский государственный строительный университет, ЭБС АСВ, 2010. — 200 с. — 2227-8397. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/16330.html>
3. Матерова С.И. Химия процессов горения [Электронный ресурс] : учебное пособие / С.И. Матерова. — Электрон. текстовые данные. — Железногорск: Сибирская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, 2017. — 63 с. — 2227-8397. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/66930.html>

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ 5

Составление материального баланса

1. Целью практического занятия является научиться составлять материальный баланс.

2. В результате освоения темы практического занятия студенты приобретают следующие умения и навыки, формируемые компетенции: способен определять круг задач в рамках поставленной цели и выбирать оптимальные способы их решения, исходя из действующих правовых норм, имеющихся ресурсов и ограничений (УК-2); способен учитывать современные тенденции развития техники и технологий в области техносферной безопасности, измерительной и вычислительной техники, информационных технологий при решении типовых задач в области профессиональной деятельности, связанной с защитой окружающей среды и обеспечением безопасности человека (ОПК-1).

3. Актуальность темы: овладение методами составления материальный баланс.

4. Теоретическая часть

Баланс – (от фр. *balance* – буквально «весы») – количественное выражение сторон какого-либо процесса, которые должны уравнивать друг друга. Другими словами, баланс – это равновесие, уравнивание. Процессы горения на пожаре подчиняются фундаментальным законам природы, в частности, законам сохранения массы и энергии.

Для решения многих практических задач, а также для выполнения пожарно-технических расчетов необходимо знать количество воздуха, необходимого для горения, а также объем и состав продуктов горения. Эти данные необходимы для расчета температуры горения веществ, давления при взрыве, избыточного давления взрыва, флегматизирующей концентрации флегматизатора, площади легкосбрасываемых конструкций.

Методика расчета материального баланса процессов горения определяется составом и агрегатным состоянием веществ. Свои особенности имеет расчет для индивидуальных химических соединений, для смеси газов и для веществ сложного элементного состава.

Индивидуальные химические соединения – это вещества, состав которых можно выразить химической формулой. Расчет процесса горения в этом случае производится по уравнению реакции горения.

5. Вопросы и задания

1. Составить уравнение реакции горения в кислороде пропана C_3H_8 и глицерина $C_3H_8O_3$, аммиака NH_3 , сероуглерода CS_2 .

Составляя уравнение реакции горения, следует помнить, что в пожарно-технических расчетах принято все величины относить к 1 молю горючего вещества. Это, в частности, означает, что в уравнении реакции горения перед горючим веществом коэффициент всегда равен 1.

Состав продуктов горения зависит от состава исходного вещества.

2. Составить уравнение реакции горения в воздухе водорода H_2 , анилина $C_6H_5NH_2$, пропанола C_3H_7OH , угарного газа CO , хлорметана $(CH_3)_2HPO_4$.

Составление реакции горения веществ в воздухе аналогично составлению реакции горения в кислороде. Особенность состоит в том, что азот воздуха при температуре горения $2000^\circ C$ в реакцию горения не вступает и выделяется из зоны горения вместе с продуктами горения.

3. Сколько молей исходных веществ участвовало в реакции и сколько молей продуктов горения образовалось при полном сгорании 1 моля бензойной кислоты C_6H_5COOH ?

6. Список литературы, рекомендуемый к использованию по данной теме

Основная литература

1. Кукин, П. П. Теория горения и взрыва : учебное пособие / П. П. Кукин, В. В. Юшин, С. Г. Емельянов ; Юго-Западный гос. ун-т, Рос. гос. технолог. ун-т им. К. Э. Циолковского (МАТИ-РГТУ). – М. : Юрайт, 2015. – 435 с. : ил., табл. – (Бакалавр). – Гриф: Доп. УМО. – Библиогр.: с. 433-435. – ISBN 978-5-9916-2722-1

2. Теория горения и взрывов [Электронный ресурс] : практикум / . — Электрон. текстовые данные. — Новосибирск: Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики, 2015. — 97 с. — 2227-8397. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/55503.html>

Дополнительная литература

1. Девисилов, В. А. Теория горения и взрыва : практикум : учеб. пособие для вузов / В.А. Девисилов, Т.И. Дроздова, С.С. Тимофеева. – Москва : ФОРУМ, 2012. – 351 с. : ил. ; 22. – (Высшее образование). – Гриф: Рек. УМО. – Библиогр.: с. 286-287. – ISBN 978-5-91134-555-6

2. Горев В.А. Теория горения и взрыва [Электронный ресурс] : учебное пособие / В.А. Горев. — Электрон. текстовые данные. — М. : Московский государственный строительный университет, ЭБС АСВ, 2010. — 200 с. — 2227-8397. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/16330.html>

3. Матерова С.И. Химия процессов горения [Электронный ресурс] : учебное пособие / С.И. Матерова. — Электрон. текстовые данные. — Железногорск: Сибирская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, 2017. — 63 с. — 2227-8397. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/66930.html>

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ 6, 8

Расчет нижних концентрационных пределов распространения пламени (воспламенения)

1. **Целью** практического занятия является научиться проводить расчеты нижних концентрационных пределов распространения пламени (воспламенения).

2. В результате освоения темы практического занятия студенты приобретают следующие умения и навыки, формируемые компетенции: способен определять круг задач в рамках поставленной цели и выбирать оптимальные способы их решения, исходя из действующих правовых норм, имеющихся ресурсов и ограничений (УК-2); способен учитывать современные тенденции развития техники и технологий в области техносферной безопасности, измерительной и вычислительной техники, информационных технологий при решении типовых задач в области профессиональной деятельности, связанной с защитой окружающей среды и обеспечением безопасности человека (ОПК-1).

3. **Актуальность темы:** овладение методами расчета параметров пожарной опасности веществ необходимо для практической деятельности студентов.

4. Теоретическая часть

Нижний (верхний) концентрационный предел распространения пламени – минимальная (максимальная) концентрация горючего в окислителе, способная воспламениться от высокоэнергетического источника с последующим распространением горения на всю смесь.

Расчетные формулы

Нижний концентрационный предел распространения пламени φ_n определяют по предельной теплоте сгорания. Установлено, что 1 м³ различных газоздушных смесей на НКПР выделяет при горении постоянное среднее количество тепла – 1830 кДж, называемое предельной теплотой горения. Следовательно,

$$\varphi_n = \frac{Q_{нр} 100}{Q_n} \quad (4.)$$

если принять среднее значение $Q_{нр}$ равным 1830 кДж/м³, то φ_n будет равно

$$\varphi_n = \frac{1830 \cdot 100}{Q_n} \quad (4.2)$$

где Q_n – низшая теплота сгорания горючего вещества, кДж/м³.

Нижний и верхний КПП пламени могут быть определены по аппроксимационной формуле

$$\varphi_{H(B)} = \frac{100}{an + b} \quad (4.3)$$

где n – стехиометрический коэффициент при кислороде в уравнении химической реакции; a и b эмпирические константы, значение которых приведены в табл. 4.1

Таблица 4.1 – Эмпирические константы

Концентрационные пределы распространения пламени	Значения коэффициента,	
	a	b
Нижний предел	4,342	4,679
Верхний предел $n \leq 15$ $n > 15$	0,775	0,560
	0,384	6,554

Концентрационные пределы распространения пламени паров жидких и твердых веществ могут быть рассчитаны, если известны температурные пределы

$$\varphi_{H(B)} = \frac{p_{n(e)} 100}{p_0} \quad (4.4)$$

где $p_{n(e)}$ – давление насыщенного пара вещества при температуре, соответствующей нижнему (верхнему) пределу распространения пламени, Па;

p_0 – давление окружающей среды, Па.

Давление насыщенного пара может быть определено по уравнению Антуана:

$$\lg P = A - \frac{B}{C + t} \quad (4.5)$$

где A, B, C – константы Антуана;

t – температура, °С, (температурные пределы)

Для расчета концентрационных пределов распространения пламени смесей горючих газов используют правило Ле-Шателье:

$$\varphi_{H(B)}^{CM} = \frac{1}{\sum \frac{\mu_i}{\varphi_{H(B)}_i}} \quad (4.6)$$

где $\varphi_{H(B)}^{CM}$ – нижний (верхний) КПП пламени смеси газов, % об.;

$\varphi_{H(B)}_i$ – нижний (верхний) предел распространения пламени i -го горючего газа
%, об.;

μ_i – мольная доля i -го горючего газа в смеси.

Следует иметь при этом в виду, что $\sum \mu_i = 1$, т.е. концентрация горючих компонентов газовой смеси принимается за 100%.

Если известны концентрационные пределы распространения пламени при температуре T_1 , то при температуре T_2 они вычисляются по формулам

$$\varphi_{H_{T_2}} = \varphi_{H_{T_1}} \left(1 - \frac{T_2 - T_1}{T_{\Gamma} - T_1} \right), \quad (4.7)$$

$$\varphi_{B_{T_2}} = \varphi_{B_{T_1}} \left(1 + \frac{T_2 - T_1}{T_{\Gamma} - T_1} \right), \quad (4.8)$$

где $\varphi_{H_{T_1}}$, $\varphi_{H_{T_2}}$ – нижний концентрационный предел распространения пламени соответственно при температурах T_2 и T_1 ;

$\varphi_{B_{T_1}}$ и $\varphi_{B_{T_2}}$ – верхний концентрационный предел распространения пламени соответственно при температурах T_1 и T_2 ;

T_{Γ} – температура горения смеси.

Приближенно при определении НКПР пламени T_{Γ} принимают 1550 К, при определении ВКПР пламени – 1100 К.

При разбавлении газовой смеси инертными газами (N_2 , CO_2 , H_2O пары и т.п.) область воспламенения сужается: верхний предел снижается, а нижний – возрастает. Концентрация инертного газа (флегматизатора), при которой нижний и верхний пределы распространения пламени смыкаются, называется минимальной флегматизирующей концентрацией φ_{ϕ} . Содержание кислорода такой системе называют минимальным взрывоопасным содержанием кислорода МВСК. Некоторое содержание кислорода ниже

МВСК называют безопасным $\varphi_{O_2 \text{ без}}$.

Расчет указанных параметров проводят по формулам

$$\varphi_{\Phi} = \frac{h_f^0 \Delta H_f^0 + h_{\Phi} + \sum h_i m_i}{h_{\Phi} - 1 + \sum h_i m_i} 100 \quad (4.9)$$

$$\varphi_{O_2} = \frac{100 - \varphi_{\Phi}}{4,844} \quad (4.10)$$

$$\varphi_{O_2 \text{ БЕЗ}} = 1,2 \varphi_{O_2} - 4,2 \quad (4.11)$$

где ΔH_f^0 – стандартная теплота образования горючего, Дж/моль;

h'_f , h''_i , h''_{ϕ} – константы, зависящие от вида химического элемента в молекуле горючего и вида флегматизатора;

m_i – количество атомов i -го элемента (структурной группы) в молекуле горючего.

Методика расчета концентрационных пределов распространения пламени
смеси газов

1. Находим нижний и верхний концентрационные пределы распространения пламени веществ, входящих в состав смеси, при стандартных условиях.

2. Расчет нижнего и верхнего концентрационных пределов распространения пламени смеси нескольких паров или газов ведут по формуле Ле-Шателье, которая выражает правило смешения. В основу формулы положено предположение, что несколько газов, находящихся на НКПР, при смешении образуют смесь, также находящуюся на нижнем (верхнем) пределе воспламенения. Формула Ле-Шателье справедлива для подавляющего большинства смесей веществ, не вступающих в химическую реакцию.

$$\varphi_{H(V), \text{см}} = \frac{100}{\sum_{i=1}^n \frac{\varphi_i}{\varphi_{H(V)i}}}, \% (\text{об.})$$

где φ_i – концентрации горючих компонентов в смеси, об. %;

$\varphi_{H(V)i}$ – НКПР или ВКПР каждого компонента в смеси, об. %.

Пример . По предельной теплоте сгорания определись нижний концентрационный предел воспламенения бутана в воздухе.

Решение. Для расчета по формуле (4.1) находим низшую теплоту сгорания вещества 2882,3 кДж/моль. Эту величину надо перевести в другую размерность – кДж/м³:

$$\frac{2882,3 \cdot 1000}{22,4} = 128,7 \cdot 10^3 \text{ кДж/м}^3$$

По формуле (4.1) определим нижний концентрационный предел распространения пламени (НКПР)

$$\varphi_H = \frac{1830 \cdot 100}{128,7 \cdot 103} = 1,42\%$$

Находим, что экспериментальное значение φ_H – 1,9%. Относительная ошибка расчета, следовательно, составила

$$\Delta_H = \frac{1,9 - 1,42}{1,9} 100 \approx 25\% .$$

5. Вопросы и задания

5.1. Рассчитать концентрационные пределы распространения пламени паров i -го вещества в воздухе. Результаты расчета сравнить с имеющимися справочными данными и определить относительную ошибку.

Таблица 4.2 – Исходные данные

Вариант	Вещество жидкость	Вещество газ
1	Амилбензол	Ацетилен
2	Н-Амиловый спирт	Метан
3	Анизол	Окись углерода
4	Анилин	Этан
5	Бутилацетат	Водород
6	Бутиловый спирт	Пропан
7	Бензол	Сероводород
8	Диэтиловый эфир	Бутан
9	Ксилол	Ацетилен
10	Уайт-спирит	Метан
11	Этиленгликоль	Окись углерода
12	Трет-Амиловый спирт	Этан
13	Гексан	Водород
14	Метиловый спирт	Пропан
15	Толуол	Сероводород
16	Стирол	Бутан
17	Пентан	Метан
18	Этанол	Этан
19	Амилметилкетон	Пропан
20	Бутилбензол	Бутан
21	Бутилвиниловый эфир	Окись углерода

5.2. Домашнее задание

Задача 1. Рассчитать концентрационные пределы распространения пламени смеси, состоящей из 30 об. % пропана и 70 об. % этана.

Задача 2. Рассчитать концентрационные пределы распространения пламени метана в г/м³ при температуре 134 °С.

Задача 3. Рассчитать концентрационные пределы распространения пламени метана в г/м³ при температуре 136 °С.

Задача 4. Рассчитать концентрационные пределы распространения пламени метана в г/м³ при температуре 138 °С.

Задача 5. Рассчитать концентрационные пределы распространения пламени метана в г/м³ при температуре 140 °С.

Задача 6. Рассчитать концентрационные пределы распространения пламени метана в г/м³ при температуре 142 °С.

Задача 7. Рассчитать концентрационные пределы распространения пламени метана в г/м³ при температуре 145 °С.

6. Список литературы, рекомендуемый к использованию по данной теме

Основная литература

1. Кукин, П. П. Теория горения и взрыва : учебное пособие / П. П. Кукин, В. В. Юшин, С. Г. Емельянов ; Юго-Западный гос. ун-т, Рос. гос. технолог. ун-т им. К. Э. Циолковского (МАТИ-РГТУ). – М. : Юрайт, 2015. – 435 с. : ил., табл. – (Бакалавр). – Гриф: Доп. УМО. – Библиогр.: с. 433-435. – ISBN 978-5-9916-2722-1
2. Теория горения и взрывов [Электронный ресурс] : практикум / . — Электрон. текстовые данные. — Новосибирск: Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики, 2015. — 97 с. — 2227-8397. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/55503.html>

Дополнительная литература

1. Девисилов, В. А. Теория горения и взрыва : практикум : учеб. пособие для вузов / В.А. Девисилов, Т.И. Дроздова, С.С. Тимофеева. – Москва : ФОРУМ, 2012. – 351 с. : ил. ; 22. – (Высшее образование). – Гриф: Рек. УМО. – Библиогр.: с. 286-287. – ISBN 978-5-91134-555-6
2. Горев В.А. Теория горения и взрыва [Электронный ресурс] : учебное пособие / В.А. Горев. — Электрон. текстовые данные. — М. : Московский государственный строительный университет, ЭБС АСВ, 2010. — 200 с. — 2227-8397. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/16330.html>
3. Матерова С.И. Химия процессов горения [Электронный ресурс] : учебное пособие / С.И. Матерова. — Электрон. текстовые данные. — Железногорск: Сибирская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, 2017. — 63 с. — 2227-8397. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/66930.html>

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ 7, 9

Расчет верхних концентрационных пределов распространения пламени (воспламенения)

1. Целью практического занятия является научиться проводить расчеты верхних концентрационных пределов распространения пламени (воспламенения).

2. В результате освоения темы практического занятия студенты приобретают следующие умения и навыки, формируемые компетенции: способен определять круг задач в рамках поставленной цели и выбирать оптимальные способы их решения, исходя из действующих правовых норм, имеющихся ресурсов и ограничений (УК-2); способен учитывать современные тенденции развития техники и технологий в области техносферной безопасности, измерительной и вычислительной техники, информационных технологий при решении типовых задач в области профессиональной деятельности, связанной с защитой окружающей среды и обеспечением безопасности человека (ОПК-1).

3. Актуальность темы: овладение методами расчета параметров пожарной опасности веществ необходимо для практической деятельности студентов.

4. Теоретическая часть

Очаги поражения при авариях на пожаро- и взрывоопасных объектах

Объекты, на которых производят, используют, перерабатывают, хранят или транспортируют легковоспламеняющиеся и пожаровзрывоопасные вещества, создающие реальную угрозу возникновения техногенной чрезвычайной ситуации, относятся к пожаровзрывоопасным объектам (ПВОО).

При возникновении и развитии чрезвычайных ситуаций на таких производствах, сопровождающихся взрывами и пожарами, которые часто сопутствуют один другому, формируются поля поражающих факторов, в качестве которых рассматриваются:

- воздушная ударная волна (ВУВ), образующаяся в результате взрывных превращений облаков газопаровоздушных смесей (ГПВС) или в результате взрыва твердых (конденсированных) взрывчатых веществ (ТВВ);
- тепловое излучение огневых шаров и горящих разлитий;
- осколки и обломки оборудования;
- обломки зданий и сооружений, образующиеся в результате взрыва ТВВ или облаков ГПВС.

Взрыв газопаровоздушной смеси. Очаг взрыва

Одной из наиболее серьезных опасностей пожаровзрывоопасных производств является газопаровое облако, которое образуется при мгновенном разрушении резервуаров хранения или испарении разлитых жидкостей.

Образование газопарового облака может привести к появлению трех типов опасностей:

- взрыву газопаровоздушной смеси;
- крупному пожару;
- токсическому воздействию.

Смесь углеводородных продуктов (метана, этилена, пропана, паров бензина, циклогексана и др.) с кислородом воздуха называется ***газопаровоздушной смесью (ГПВС)***. Эта смесь может либо *взрываться* либо *воспламеняться*. *Воспламеняемость и взрываемость* тесно связаны друг с другом и поэтому трудно предсказать, что произойдет при воспламенении

ГПВС – взрыв или пожар, так как это зависит от определенной концентрации углеводородов в объеме воздуха. Данное свойство ГПВС определяется концентрационными пределами воспламенения рассматриваемого вещества и характеризуется количеством газа в 1 м^3 воздуха, при котором возможно воспламенение газовоздушной смеси. Так, например, возгорание смеси пропана с воздухом происходит при наличии в 1 м^3 воздуха не менее 95 л газа, а взрываемость при значительно меньших концентрациях: в 1 м^3 воздуха не более 21 л пропана.

При аварийных взрывах ГПВС размеры зон разрушений и параметры избыточного давления ВУВ зависят от количества взрывоопасного вещества и его физико-химических свойств.

При взрыве газо- или паровоздушной смеси образуется воздушная ударная волна.

Территория, подвергшаяся воздействию ударной волны, называется очагом взрыва. Его внешняя граница проходит через точки на местности с избыточным давлением во фронте ВУВ $\Delta P_{\text{ф}} = 3$ кПа. В очаге взрыва ГПВС принято выделять следующие круговые зоны, рис.6.1.

В пределах зоны ВУВ, с целью прогнозирования последствий взрыва, выделяют зоны разрушений.

– *Зона полных разрушений* – $\Delta P_{\text{ф}} = 100$ кПа, 100% безвозвратных потерь среди населения, полное разрушение зданий и сооружений.

– *Зона сильных разрушений* – $\Delta P_{\text{ф}} = 70$ кПа, до 90% безвозвратных потерь среди незащищенного населения, полное и сильное разрушение зданий и сооружений.

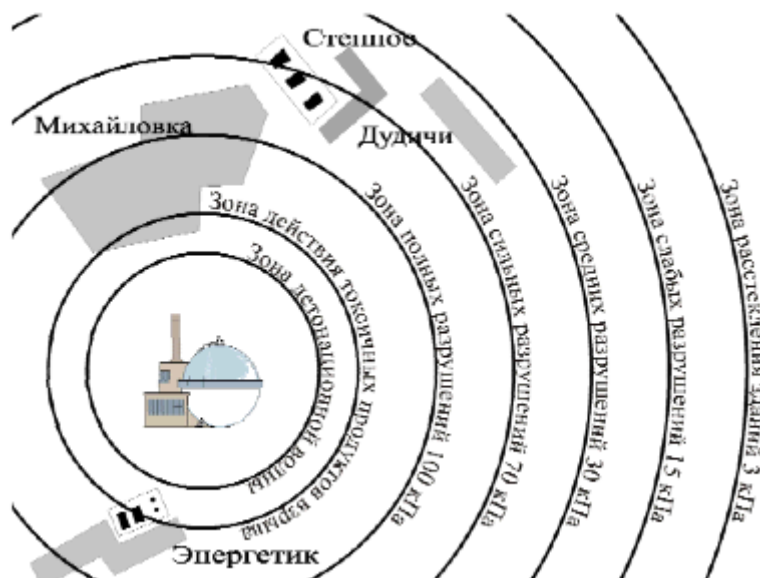


Рисунок 6.1 – Зоны разрушений при взрывах ГПВС

– *Зона средних разрушений* – $\Delta P_{\text{ф}} = 30$ кПа, до 20% безвозвратных потерь среди незащищенного населения, среднее и сильное разрушение зданий и сооружений.

– *Зона слабых разрушений* – $\Delta P_{\text{ф}} = 15$ кПа, слабое и среднее разрушение зданий и сооружений.

– *Зона расстекления зданий и сооружений* – $\Delta P_{\text{ф}} = 3$ кПа. Внешняя граница данной зоны определяет безопасное эвакуационное расстояние.

Характер воздействия ВУВ на человека, здания и сооружения зависит от типа взрыва. Различают два основных типа – **детонационный и дефлаграционный взрывы**. Поэтому при прогнозировании последствий аварий на пожаровзрывоопасных объектах необходимо предварительно идентифицировать наиболее вероятный режим взрывного превращения ГПВС.

5. Вопросы и задания

Рассчитать температурные пределы воспламенения, температуру вспышки паров i -го вещества в воздухе. Результаты расчета сравнить с имеющимися справочными данными и определить относительную ошибку. Построить зоны поражения.

Вариант	Вещество жидкость	Вещество газ
1	Амилбензол	Ацетилен
2	Н-Амиловый спирт	Метан
3	Анизол	Окись углерода
4	Анилин	Этан
5	Бутилацетат	Водород
6	Бутиловый спирт	Пропан
7	Бензол	Сероводород
8	Диэтиловый эфир	Бутан
9	Ксилол	Ацетилен
10	Уайт-спирит	Метан

11	Этиленгликоль	Оксид углерода
12	Трет-Амиловый спирт	Этан
13	Гексан	Водород
14	Метиловый спирт	Пропан
15	Толуол	Сероводород
16	Стирол	Бутан
17	Пентан	Метан
18	Этанол	Этан
19	Амилметилкетон	Пропан
20	Бутилбензол	Бутан
21	Бутилвиниловый эфир	Оксид углерода
22	Ацетон	Ацетилен
23	Этиловый спирт	Водород
24	Гептан	Метан
25	Октан	Ацетилен

6. Список литературы, рекомендуемый к использованию по данной теме

Основная литература

1. Кукин, П. П. Теория горения и взрыва : учебное пособие / П. П. Кукин, В. В. Юшин, С. Г. Емельянов ; Юго-Западный гос. ун-т, Рос. гос. технолог. ун-т им. К. Э. Циолковского (МАТИ-РГТУ). – М. : Юрайт, 2015. – 435 с. : ил., табл. – (Бакалавр). – Гриф: Доп. УМО. – Библиогр.: с. 433-435. – ISBN 978-5-9916-2722-1

2. Теория горения и взрывов [Электронный ресурс] : практикум / . — Электрон. текстовые данные. — Новосибирск: Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики, 2015. — 97 с. — 2227-8397. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/55503.html>

Дополнительная литература

1. Девисилов, В. А. Теория горения и взрыва : практикум : учеб. пособие для вузов / В.А. Девисилов, Т.И. Дроздова, С.С. Тимофеева. – Москва : ФОРУМ, 2012. – 351 с. : ил. ; 22. – (Высшее образование). – Гриф: Рек. УМО. – Библиогр.: с. 286-287. – ISBN 978-5-91134-555-6

2. Горев В.А. Теория горения и взрыва [Электронный ресурс] : учебное пособие / В.А. Горев. — Электрон. текстовые данные. — М. : Московский государственный строительный университет, ЭБС АСВ, 2010. — 200 с. — 2227-8397. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/16330.html>

3. Матерова С.И. Химия процессов горения [Электронный ресурс] : учебное пособие / С.И. Матерова. — Электрон. текстовые данные. — Железногорск: Сибирская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, 2017. — 63 с. — 2227-8397. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/66930.html>

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ 10, 11

Температурные показатели пожарной опасности жидкостей, аэрогелей и аэрозолей

1. Целью практического занятия является научиться определять температурные показатели пожарной опасности материалов и веществ.

2. В результате освоения темы практического занятия студенты приобретают следующие умения и навыки, формируемые компетенции: способен определять круг задач в рамках поставленной цели и выбирать оптимальные способы их решения, исходя из действующих правовых норм, имеющихся ресурсов и ограничений (УК-2); способен учитывать современные тенденции развития техники и технологий в области техносферной безопасности, измерительной и вычислительной техники, информационных технологий при решении типовых задач в области профессиональной деятельности, связанной с защитой окружающей среды и обеспечением безопасности человека (ОПК-1).

3. Актуальность темы: овладение методами расчета параметров пожарной опасности веществ необходимо для практической деятельности студентов.

4. Теоретическая часть

Температура взрыва – температура (зоны пламени), до которой нагреваются продукты реакции горения. Это максимальная температура зоны химической реакции (зоны пламени).

Температура взрыва определяется из уравнения теплового баланса

$$Q_H = \sum C_{pi} V_{ni} (T_{\text{в}} - T_0) \quad (9.1)$$

При этом адиабатическая температура взрыва

$$T_{\text{в}}^* = T_0 + \frac{Q_H}{\sum C_{pi} V_{ni}} \quad (9.2)$$

а действительная температура взрыва

$$T_{\text{в}} = T_0 + \frac{Q_{\text{пг}}}{\sum C_{pi} V_{ni}} \quad (9.3)$$

где $T_{\text{в}}^*$ и $T_{\text{в}}$ – соответственно адиабатическая и действительная температуры взрыва;

T_0 – начальная температура;

V_{ni} – объем i -го продукта горения;

Q_H – низшая теплота горения вещества;

$Q_{\text{пг}}$ – теплота, пошедшая на нагрев продуктов горения.

Таблица 9.1 – Расчет параметров

№	Определяемые параметры	Примечание
1	Объем и состав продуктов горения	кмоль, м ³
2	Низшая теплота сгорания или количество тепла, пошедшего на нагрев продуктов горения (при наличии теплопотерь)	Q_{ng} или Q_H кДж/кмоль, кДж/кг
3	Среднее значение энтальпии продуктов горения	$H_{cp} = \frac{Q_{H(пг)}}{\sum V_{ni}} \quad (9.5)$

4	Температура горения T_1 (табл. 1,2 прил.) по средней энтальпии с помощью табл. 1 (если H_{cp} выражена в кДж/м ³), ориентируясь на азот (наибольшее содержание в продуктах горения)	
5	Теплосодержание продуктов горения с температурой T_1 (табл. 1,2 прил.)	$Q_{n2} = \sum H_i V_{n2i}$ (9.6)
6	Если $Q'_{пг} < Q_{н(пг)}$, то $T_2 > T_1$ (в том случае, если $Q'_{пг} > Q_{н(пг)}$, то $T_2 < T_1$)	H_i – энтальпия i -продукта горения; V_i – объём i -продукта горения
7	Q''_{n2} по формуле (4.1.6)	
8	Расчет проводим до получения неравенства $Q'_{n2} < Q_{н(n2)} < Q''_{n2}$	
9	Температура горения	$T_{г} = T_1 + \frac{(Q_{н(пг)} - Q'_{пг})(T_2 - T_1)}{Q''_{пг} - Q'_{пг}}$ (9.7)

При этом

$$Q_{пг} = Q_{н(1-\eta)} \quad (9.4)$$

где η – доля теплопотерь в результате излучения энергии, химического и механического недожога.

Расчет температуры взрыва по формуле (9.2) или (9.3) может быть проведен только методом последовательных приближений, поскольку теплоемкость газов зависит от температуры горения (табл. 9.1)

Действительная температура взрыва 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 взрыва может быть значительно упрощена, если теплоемкость продуктов горения выбирать при температуре 1300 К:

$$T_{пг} = T_0 + \frac{Q_{н}}{\sum C_{pi}^* V_{пг}} \quad (9.8)$$

где C_{pi}^* – теплоемкость i -го продукта горения при 1500 К (таблица 9.2)

Таблица 9.2 – Теплоемкость i -го продукта горения

Вещество	Теплоёмкость	
	кДж/(м·К)	Дж/(моль·К)
CO ₂	2,27	50,85·10 ⁻³
SO ₂	2,28	51,07·10 ⁻³
H ₂ O (пар)	1,78	39,87 10 ⁻³
N ₂	1,42	31,81·10 ⁻³
Воздух	1,44	32,26·10 ⁻³

Давление при взрыве – важный фактор для расчета противовзрывной защиты аппаратов и расчета ослабленных и легкобрасываемых конструкций зданий и сооружений.

Давление при взрыве можно определить по формуле:

$$P_{взр} = \frac{P_0 \cdot T_{взр} \sum_{i=1}^n n_i}{T_0 \sum_{i=1}^m m_i} \quad (9.9)$$

где P_0 – начальное давление смеси;
 T_0 – начальная температура смеси;
 $T_{взр}$ – температура взрыва;
 $\sum_{i=1}^n n_i$ – сумма молей продуктов горения;
 $\sum_{i=1}^n m_i$ – сумма молей исходной смеси.

Пример

Пример 1. Рассчитать температуру взрыва и развиваемого давления при взрыве паров уксусной кислоты CH_3COOH в смеси с воздухом при стехиометрической концентрации при начальной температуре $25^\circ C$ и давления $101,325$ КПа.

Решение

По справочным данным (справочник Корольченко) определяем стандартную теплоту сгорания одного моля уксусной кислоты

$$\Delta H = -786500 \text{ Дж}$$

Составляем термохимическое уравнение реакции горения



Определяем разность молей продуктов горения и исходной смеси

$$n_{не} = 2 + 2 + 2 \cdot 3,76 = 11,52 \text{ моль}$$

$$n_{исх} = 1 + 2 + 2 \cdot 3,76 = 10,52 \text{ моль}$$

$$\Delta n = n_{не} - n_{исх} = 11,52 - 10,52 = 1 \text{ моль}$$

Определяем энергию взрыва

$$Q_{взр} = \Delta H - R \cdot T \cdot \Delta n$$

$$Q_{взр} = -786500 - 8,314 \cdot (273 + 25) \cdot 1 = -788977,6 \text{ Дж}$$

Определяем внутреннюю энергию продуктов взрыва, приняв начальную температуру взрыва равной $2200 K$

$$U_1 = 2 \cdot 95,062 + 2 \cdot 74,083 + 2 \cdot 3,76 \cdot 53,845 = 743,204 \text{ КДж} = 743204 \text{ Дж}$$

Внутренняя энергия продуктов взрыва оказалась меньше энергии взрыва, значит принимаем за температуру взрыва следующую большую и повторяем расчет

$$U_2 = 2 \cdot 105,727 + 2 \cdot 82,760 + 2 \cdot 3,76 \cdot 59,477 = 824,241 \text{ КДж} = 824241 \text{ Дж}$$

Внутренняя энергия продуктов взрыва оказалась выше энергии взрыва, значит температуру взрыва следует определять методом интерполяции.

Находит температуру взрыва методом линейной интерполяции

$$T_{взр} = 2200 + \frac{(2400 - 2200) \cdot (788977,6 - 743204)}{(824241 - 743204)} = 2312,97 \text{ К}$$

Определяем давление взрыва паров уксусной кислоты в смеси с воздухом при стехиометрической концентрации и при заданных условиях

$$P_{взр} = \frac{P_0 \cdot T_{взр} \cdot \sum_{i=1}^n n_i}{T_0 \cdot \sum_{i=1}^m m_i}; [\text{КПа}]$$

$$P_{взр} = \frac{101,325 \cdot 2312,97 \cdot (2 + 2 + 2 \cdot 3,76)}{(273 + 25) \cdot (1 + 2 + 2 \cdot 3,76)} = 935,96 \text{ КПа} = 9,2 \text{ атм} = 7020,3 \text{ мм.рт.ст.}$$

5. Вопросы и задания

Рассчитать температуру и давление при взрыве паров горючей жидкости при начальной температуре ... $^\circ C$ и давлении ... мм рт. ст. Концентрация стехиометрическая.

Вариант	Вещество	$T_o, ^\circ\text{C}$	$P_o, \text{мм рт.ст.}$
1	Амилбензол	10	780
2	Н-Амиловый спирт	11	760
3	Анизол	12	778
4	Анилин	15	762
5	Бутилацетат	17	776
6	Бутиловый спирт	18	764
7	Бензол	-5	774
8	Диэтиловый эфир	20	768
9	Ксилол	22	772
10	Уайт-спирит	-6	770
11	Этиленгликоль	25	740
12	Трет-Амиловый спирт	27	758
13	Гексан	5	742
14	Метиловый спирт	8	756
15	Толуол	-10	744
16	Стирол	12	754
17	Пентан	18	746
18	Этанол	4	752
19	Амилметилкетон	-6	748
20	Бутилбензол	6	750
21	Бутилвиниловый эфир	-4	769
22	Ацетон	4	779
23	Этиловый спирт	-2	749
24	Гептан	2	761
25	Октан	28	765
26	Гексан	19	759
27	Бутиловый спирт	-6	757
28	Анилин	21	769
29	Бензол	-11	770
30	Ксилол	13	754

6. Список литературы, рекомендуемый к использованию по данной теме

Основная литература

1. Кукин, П. П. Теория горения и взрыва : учебное пособие / П. П. Кукин, В. В. Юшин, С. Г. Емельянов ; Юго-Западный гос. ун-т, Рос. гос. технолог. ун-т им. К. Э. Циолковского (МАТИ-РГТУ). – М. : Юрайт, 2015. – 435 с. : ил., табл. – (Бакалавр). – Гриф: Доп. УМО. – Библиогр.: с. 433-435. – ISBN 978-5-9916-2722-1
2. Теория горения и взрывов [Электронный ресурс] : практикум / . — Электрон. текстовые данные. — Новосибирск: Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики, 2015. — 97 с. — 2227-8397. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/55503.html>

Дополнительная литература

1. Девисилов, В. А. Теория горения и взрыва : практикум : учеб. пособие для вузов / В.А. Девисилов, Т.И. Дроздова, С.С. Тимофеева. – Москва : ФОРУМ, 2012. – 351 с. : ил. ; 22. – (Высшее образование). – Гриф: Рек. УМО. – Библиогр.: с. 286-287. – ISBN 978-5-91134-555-6

2. Горев В.А. Теория горения и взрыва [Электронный ресурс] : учебное пособие / В.А. Горев. — Электрон. текстовые данные. — М. : Московский государственный строительный университет, ЭБС АСВ, 2010. — 200 с. — 2227-8397. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/16330.html>

3. Матерова С.И. Химия процессов горения [Электронный ресурс] : учебное пособие / С.И. Матерова. — Электрон. текстовые данные. — Железногорск: Сибирская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, 2017. — 63 с. — 2227-8397. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/66930.html>

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ 12

Расчет температурных пределов распространения пламени (воспламенении)

1. **Целью** практического занятия является научиться проводить расчеты температурных пределов распространения пламени (воспламенении).

2. **В результате освоения темы практического занятия студенты приобретают следующие умения и навыки, формируемые компетенции:** способен определять круг задач в рамках поставленной цели и выбирать оптимальные способы их решения, исходя из действующих правовых норм, имеющихся ресурсов и ограничений (УК-2); способен учитывать современные тенденции развития техники и технологий в области техносферной безопасности, измерительной и вычислительной техники, информационных технологий при решении типовых задач в области профессиональной деятельности, связанной с защитой окружающей среды и обеспечением безопасности человека (ОПК-1).

3. **Актуальность темы:** овладение методами расчета параметров пожарной опасности веществ необходимо для практической деятельности студентов.

4. Теоретическая часть

Нижний (верхний) температурный предел распространения пламени – температура жидкости, при которой концентрация насыщенных паров равна нижнему (верхнему) концентрационному пределу распространения.

Существует несколько полуэмпирических методов расчета температурных пределов распространения пламени, однако они мало отличаются друг от друга по точности.

Температурные пределы распространения пламени (ТПР) жидкостей рассчитывают по температуре кипения

$$t_{H(B)} = kt_{КИП} - l \quad (5.1)$$

где $t_{H(B)}$ – нижний (верхний) температурный предел распространения пламени;

$t_{КИП}$ – температура кипений, °С;

k, l – константы для определенных групп (гомологических рядов) жидкостей.

Температурные пределы распространения пламени могут быть определены по известным значениям концентрационных пределов

$$P_{H(B)} = \frac{\varphi_{H(B)} P_O}{100} \quad (5.2)$$

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

$\varphi_{H(B)}$ – нижний (верхний) концентрационный предел распространения пламени;

P_O – атмосферное давление.

Из уравнения Антуана определяем температуру вещества, при которой достигается данное давление. Эта температура будет являться соответственно нижним (верхним) пределом воспламенения.

Примеры

Пример 1. Определить ТПР пламени метилового спирта, если температура его кипения равна 65°C.

Решение.

Расчет проводим по формуле (5.1), значение констант определяем по табл. (выдается преподавателем) для нормальных жирных спиртов

$$t_H = 0,5746 \cdot 65 - 33,7 = 3,6^\circ\text{C} = 276,6 \text{ К};$$

$$t_B = 0,6028 \cdot 65 - 15,0 = 30^\circ\text{C} = 303 \text{ К}.$$

Определим относительную ошибку расчета. По табл. (справочные данные) находим, что ТПР пламени метилового спирта составляют 280 – 320 К:

$$\Delta_H = \frac{276,6 - 280}{280} 100 = -1,2\% \quad \Delta_B = \frac{303 - 312}{312} 100 = -2,9\%$$

Следовательно, результаты расчета занижены менее чем на 3%.

Пример 2. Определить температурные пределы распространения пламени ацетона, если его концентрационные пределы в воздухе равны 2,2 – 13,0%. Атмосферное давление – нормальное.

Решение.

По формуле (5.2) определим давление насыщенного пара ацетона, соответствующее нижнему и верхнему температурным пределам распространения пламени,

$$P_H = \frac{2,2 \cdot 101325}{100} = 2230 \text{ Па};$$

$$P_H = \frac{13,0 \cdot 101325}{100} = 13172 \text{ Па}$$

$$P_H = \frac{2230}{133,32} = 16,78 \text{ мм.р.ст.};$$

$$P_H = \frac{13172}{13332} = 98,9 \text{ мм.р.ст.}$$

Из уравнения Антуана следует

$$t = \frac{B}{A - \lg P} - C$$

Из табл. (справочные данные) находим значение констант A , B и C для ацетона

$$A=7,25058; \quad B=1281,721; \quad C=237,088.$$

$$\lg P_H = 1,2235; \quad \lg P_B = 1,9994.$$

$$t_H = \frac{1281,721}{7,25058 - 1,2235} - 237,088 = -25^\circ\text{C} = 248 \text{ К};$$

$$t_B = \frac{1281,721}{7,25058 - 1,9994} - 237,088 = 8^\circ\text{C} = 281 \text{ К}.$$

Для решения этой же задачи можно воспользоваться данными табл.7 приложения. Из табл. (справочные данные) следует, что НТПР пламени находим между температурами 241,9-252,2°С, а ВТПР пламени – между 271,0 и 280,7 К.

Линейной интерполяцией определим ТПР пламени:

$$T_H = 2417,9 + \frac{(22,3 - 13,33)(252,2 - 241,9)}{26,66 - 13,33} = 248,8K$$

$$T_B = 271 + \frac{(131,7 - 79,99)(280,7 - 271)}{133,32 - 79,99} = 280,4K$$

5. Вопросы и задания

Рассчитать температурные пределы воспламенения паров i -го вещества в воздухе. Результаты расчета сравнить с имеющимися справочными данными и определить относительную ошибку

Таблица 5.1 – Исходные данные

Вариант	Вещество жидкость	Вещество газ
1	Амилбензол	Ацетилен
2	Н-Амиловый спирт	Метан
3	Анизол	Оксид углерода
4	Анилин	Этан
5	Бутилацетат	Водород
6	Бутиловый спирт	Пропан
7	Бензол	Сероводород
8	Диэтиловый эфир	Бутан
9	Ксилол	Ацетилен
10	Уайт-спирит	Метан
11	Этиленгликоль	Оксид углерода
12	Трет-Амиловый спирт	Этан
13	Гексан	Водород
14	Метиловый спирт	Пропан
15	Толуол	Сероводород
16	Стирол	Бутан
17	Пентан	Метан
18	Этанол	Этан
19	Амилметилкетон	Пропан
20	Бутилбензол	Бутан
21	Бутилвиниловый эфир	Оксид углерода
22	Ацетон	Ацетилен
23	Этиловый спирт	Водород

24	Гептан	Метан
25	Октан	Ацетилен
26	Гексан	Метан
27	Бутиловый спирт	Оксид углерода
28	Анилин	Этан
29	Бензол	Водород
30	Ксилол	Пропан

6. Список литературы, рекомендуемый к использованию по данной теме

Основная литература

1. Кукин, П. П. Теория горения и взрыва : учебное пособие / П. П. Кукин, В. В. Юшин, С. Г. Емельянов ; Юго-Западный гос. ун-т, Рос. гос. технолог. ун-т им. К. Э. Циолковского (МАТИ-РГТУ). – М. : Юрайт, 2015. – 435 с. : ил., табл. – (Бакалавр). – Гриф: Доп. УМО. – Библиогр.: с. 433-435. – ISBN 978-5-9916-2722-1

2. Теория горения и взрывов [Электронный ресурс] : практикум / . — Электрон. текстовые данные. — Новосибирск: Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики, 2015. — 97 с. — 2227-8397. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/55503.html>

Дополнительная литература

1. Девисилов, В. А. Теория горения и взрыва : практикум : учеб. пособие для вузов / В.А. Девисилов, Т.И. Дроздова, С.С. Тимофеева. – Москва : ФОРУМ, 2012. – 351 с. : ил. ; 22. – (Высшее образование). – Гриф: Рек. УМО. – Библиогр.: с. 286-287. – ISBN 978-5-91134-555-6

2. Горев В.А. Теория горения и взрыва [Электронный ресурс] : учебное пособие / В.А. Горев. — Электрон. текстовые данные. — М. : Московский государственный строительный университет, ЭБС АСВ, 2010. — 200 с. — 2227-8397. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/16330.html>

3. Матерова С.И. Химия процессов горения [Электронный ресурс] : учебное пособие / С.И. Матерова. — Электрон. текстовые данные. — Железногорск: Сибирская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, 2017. — 63 с. — 2227-8397. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/66930.html>

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ 13, 14

Расчет температуры вспышки и воспламенения

1. **Целью** практического занятия является научиться проводить расчеты температуры вспышки и воспламенения.

2. **В результате освоения темы практического занятия студенты приобретают следующие умения и навыки, формируемые компетенции:** способен определять круг задач в рамках поставленной цели и выбирать оптимальные способы их решения, исходя из действующих правовых норм, имеющихся ресурсов и ограничений (УК-2); способен учитывать современные тенденции развития техники и технологий в области техносферной безопасности, измерительной и вычислительной техники, информационных технологий при решении типовых задач в области профессиональной деятельности, связанной с защитой окружающей среды и обеспечением безопасности человека (ОПК-1).

3. Актуальность темы: овладение методами расчета параметров пожарной опасности веществ необходимо для практической деятельности студентов.

4. Теоретическая часть

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

Температура воспламенения – минимальная температура жидкости, при которой в условиях, специальных испытаний, происходит воспламенение паров жидкости при кратковременном воздействии высоко энергетического источника с последующим переходом горения в стационарный диффузионный режим.

Наиболее распространенным и достаточно точным является Pa – счет температур вспышки и воспламенения по формуле В.И. Блинова

$$T_{BC(BП)} = \frac{A}{P_{НП} D n} \quad (7.1)$$

где $T_{BC(BП)}$ – температура вспышки (воспламенения);

$P_{НП}$ – давление насыщенного пара при температуре вспышки (воспламенения);

D – коэффициент диффузии поров горючего в воздухе;

n – стехиометрический коэффициент при кислороде – количество молей кислорода, необходимое для полного окисления (до CO_2 , H_2O , SO_2 ;) одного моля горючего вещества;

A – константа метода определения (табл. 7.1).

Таблица 7.1 – Значение параметра A

Температура, K	Значение параметра A , $\frac{m^2 \cdot K \cdot Па}{с}$
Вспышки в закрытом тигле	28,0
Вспышки в открытом тигле	45,3
Воспламенения	53,3

Коэффициенты диффузии некоторых газов и паров в воздухе при нормальных условиях (D_0) приведены в табл. (справочные данные). При их отсутствии последние определяют по формуле

$$D_0 = \frac{10^{-1}}{\sqrt{\sum \Delta M_i \mu_i}} \quad (7.2)$$

где D_0 – коэффициент диффузии, m^2/c ;

μ_i – количество i -го элемента в молекуле горючего вещества;

ΔM_i – атомные (элементные) составляющие (табл. 7.2).

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

$$D = D_0 \left(\frac{T}{273} \right)^n \quad (7.3)$$

где n – показатель значение которого приведено в табл. (справочные данные).

Таблица 7.2 – Атомные составляющие

Название i -го элемента	Значение ΔM *
Углерод	25 – 50
Водород	1
Кислород	17
Азот	16
Сера	48
Хлор	37
Бром	79
Йод	104
Фтор	16

* значение ΔM зависит от числа атомов углерода и их положения в молекуле горючего:

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

Простым, но менее четным является расчет температур вспышки в закрытом тигле по формуле Элея

$$t_{BC} = t_{КИП} - 18\sqrt{k} \quad (7.4)$$

где t_{BC} – температура вспышки, °C;

$t_{КИП}$ – температура кипения, °C;

k – коэффициент, определяющий по формуле:

$$k = 4m_C + m_H + 4m_S + m_N - 2m_O - 2m_{Cl} - 3m_F - 5m_{Br} \quad (7.5)$$

где $m_C, m_H, m_S, m_N, m_O, m_{Cl}, m_F, m_{Br}$ – количество элементов углерода, водорода, серы, азота, кислорода, хлора, фтора, брома в молекуле горючего вещества.

Температура вспышки в закрытом тигле может быть определена по нижнему температурному пределу воспламенения

$$t_{BC} = \frac{t_H + 2}{0,875} \quad (7.6)$$

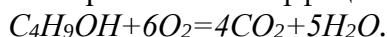
эта формула применима, если $0 < t_{BC} < 160^\circ\text{C}$.

Примеры

Пример 1. по формуле В.И. Блинова определить температуру воспламенения бутилового спирта.

Решение.

1. Определим значение стехиометрического коэффициента



Следовательно, $n=6$.

2. Определим значение коэффициента диффузии по формуле (7.2). Для этого по табл. 7.2 устанавливаем, что $\Delta M=25+3,4=37$, тогда

$$D_0 = \frac{10^{-4}}{\sqrt{37 \cdot 4 + 1 \cdot 10 + 17 \cdot 1}} = 75,8 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$$

3. По табл. 7.1 выберем значение $A=53,3$ и по формуле (7.1) определим произведение

$$T_{ВП} P_{НП} = \frac{53,3}{75,8 \cdot 10^{-7} \cdot 6} = 1172 \cdot 10^{-3} \text{ К} \cdot \text{Па}$$

4. По табл. (справочные данные) задаемся температурой 326,4 К, давление насыщенного пара при которой равно 5333 Па.

Произведение $TP=326,4 \cdot 5333 = 1740 \cdot 10^3 \text{ К} \cdot \text{Па}$.

Сравнивая полученные значения с вычислением в п.3, устанавливаем, что $T_{ВП} P_{НП} < TP$.

5. Задаемся по табл. (справочные данные) меньшей температурой 314,5 К. Давление насыщенного пара при этом равно 2666 Па.

$TP=314,5 \cdot 2666 = 840 \cdot 10^3 \text{ К} \cdot \text{Па}$.

Так как $TP > T_{ВП} P_{НП}$, линейной интерполяцией находим значение температуры воспламенения

$$T_{ВП} = 314,5 + \frac{10^3(1172 - 840)(326,4 - 314,5)}{10^3(1740 - 840)} = 319 \text{ К}$$

Справочное значение температуры воспламенения составляет 314 К.

$$\Delta = \frac{319 - 314}{314} = 1,6\%$$

Погрешность расчета

Пример 2. По формуле Эля определить, температуру вспышки бензола в закрытом тигле.

Решение.

Для расчета по формуле (7.4) необходимо знать температуру кипения бензола (C_6H_6) и значение коэффициента k .

Температура кипения бензола 353 К или 80 °С. Величину k определим

$$\text{по формуле } K_{Pi} = \frac{S_{Pi}}{S_{Pi}}$$

$$k = 4 \cdot 6 + 6 = 30.$$

Определим искомую величину температуры вспышки

$$T_{BC} = 80 - 18 \sqrt{30} = 18,6 \text{ °С или } 254,4 \text{ К}.$$

Согласно справочным данным, температура вспышки бензола равна 259 К. Определим ошибку расчета

$$\Delta = \frac{254,4 - 259}{259} 100 = -1,8\%$$

Результат расчета занижен менее чем на 2%

5. Вопросы и задания

Рассчитать температуру вспышки паров i -го вещества в воздухе. Результаты расчета сравнить с имеющимися справочными данными и определить относительную ошибку

Таблица 7.3 – Исходные данные

Вариант	Вещество жидкость	Вещество газ
1	Амилбензол	Ацетилен
2	Н-Амиловый спирт	Метан
3	Анизол	Оксид углерода
4	Анилин	Этан
5	Бутилацетат	Водород
6	Бутиловый спирт	Пропан
7	Бензол	Сероводород
8	Диэтиловый эфир	Бутан
9	Ксилол	Ацетилен
10	Уайт-спирит	Метан
11	Этиленгликоль	Оксид углерода
12	Трет-Амиловый спирт	Этан
13	Гексан	Водород
14	Метиловый спирт	Пропан
15	Толуол	Сероводород
16	Стирол	Бутан
17	Пентан	Метан
18	Этанол	Этан
19	Амилметилкетон	Пропан
20	Бутилбензол	Бутан
21	Бутилвиниловый эфир	Оксид углерода
22	Ацетон	Ацетилен
23	Этиловый спирт	Водород
24	Гептан	Метан
25	Октан	Ацетилен
26	Гексан	Метан
27	Бутиловый спирт	Оксид углерода
28	Анилин	Этан
29	Бензол	Водород

30	Ксилол	Пропан
----	--------	--------

6. Список литературы, рекомендуемый к использованию по данной теме

Основная литература

1. Кукин, П. П. Теория горения и взрыва : учебное пособие / П. П. Кукин, В. В. Юшин, С. Г. Емельянов ; Юго-Западный гос. ун-т, Рос. гос. технолог. ун-т им. К. Э. Циолковского (МАТИ-РГТУ). – М. : Юрайт, 2015. – 435 с. : ил., табл. – (Бакалавр). – Гриф: Доп. УМО. – Библиогр.: с. 433-435. – ISBN 978-5-9916-2722-1
2. Теория горения и взрывов [Электронный ресурс] : практикум / . — Электрон. текстовые данные. — Новосибирск: Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики, 2015. — 97 с. — 2227-8397. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/55503.html>

Дополнительная литература

1. Девисилов, В. А. Теория горения и взрыва : практикум : учеб. пособие для вузов / В.А. Девисилов, Т.И. Дроздова, С.С. Тимофеева. – Москва : ФОРУМ, 2012. – 351 с. : ил. ; 22. – (Высшее образование). – Гриф: Рек. УМО. – Библиогр.: с. 286-287. – ISBN 978-5-91134-555-6
2. Горев В.А. Теория горения и взрыва [Электронный ресурс] : учебное пособие / В.А. Горев. — Электрон. текстовые данные. — М. : Московский государственный строительный университет, ЭБС АСВ, 2010. — 200 с. — 2227-8397. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/16330.html>
3. Матерова С.И. Химия процессов горения [Электронный ресурс] : учебное пособие / С.И. Матерова. — Электрон. текстовые данные. — Железногорск: Сибирская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, 2017. — 63 с. — 2227-8397. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/66930.html>

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ 15

Расчет стандартной температуры самовоспламенения

1. **Целью** практического занятия является научиться проводить расчеты по определению стандартной температуры самовоспламенения.

2. **В результате освоения темы практического занятия студенты приобретают следующие умения и навыки, формируемые компетенции:** способен определять круг задач в рамках поставленной цели и выбирать оптимальные способы их решения, исходя из действующих правовых норм, имеющихся ресурсов и ограничений (УК-2); способен учитывать современные тенденции развития техники и технологий в области техносферной безопасности, измерительной и вычислительной техники, информационных технологий при решении типовых задач в области профессиональной деятельности, связанной с защитой окружающей среды и обеспечением безопасности человека (ОПК-1).

3. **Актуальность темы:** овладение методами расчета параметров пожарной опасности веществ необходимо для практической деятельности студентов.

4. Теоретическая часть

Расчет стандартной температуры самовоспламенения

Температура самовоспламенения – минимальная температура газо-(паро-)воздушной смеси, при которой происходит ее воспламенение без влияния высокоэнергетического источника зажигания.

Расчет температуры самовоспламенения проводят в следующей последовательности.

Определяют количество углеродных цепей

$$m_{Ц} = \frac{M_P(M_P - 1)}{2}, \quad (8.1)$$

где $m_{Ц}$ – общее число цепей;

M_P – количество функциональных групп в молекуле горючего вещества $-CH_3$, $-OH$, фенил. Фенильная группа может быть как концевой, так и в середине цепи.

Определяют длину каждой цепи (количество атомов углерода) и среднюю длину цепи

$$l_{CP} = \frac{\sum m_i C_i}{m_{Ц}} \quad (6.2)$$

где C_i – количество атомов у углерода в i -й цепи.

При определении, C_i надо иметь в виду, что группа $-OH$ удлиняет цепь, а фенильная группа уменьшает её на один атом углерода.

По справочным данным по средней длине цепи определяют температуру самовоспламенения. Температуру самовоспламенения можно также рассчитать по формулам

$$l_C = 300 + 116\sqrt{5 - l_{CP}} \quad \text{при } l_{CP} \leq 5; \quad (8.3, a)$$

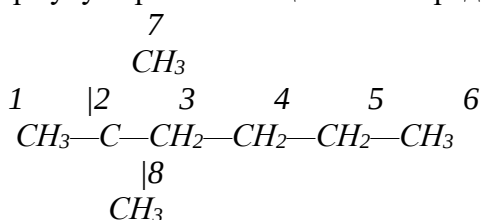
$$l_C = 300 - 38\sqrt{l_{CP} - 5} \quad \text{при } l_{CP} > 5; \quad (6.3, b)$$

Примеры

Пример 1. рассчитать температуру самовоспламенения 2,2-диметилгексана.

Решение.

Запишем структурную формулу горючего вещества и определим количество цепей



$M_P = 4$, так как в молекуле содержится четыре группы $-CH_3$.

$$m_{Ц} = \frac{4(4 - 1)}{2} = 6$$

2. Находим длину каждой цепи и среднюю длину

m_i	1-6	7-6	8-6	1-7	1-8	7-8
C_i	6	6	6	3	3	3

$$l_{CP} = \frac{3 \cdot 6 + 3 \cdot 3}{6} = 4,5$$

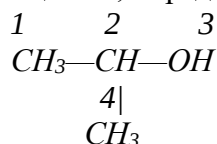
По справочным данным определяем, что температура самовоспламенения равна 643 К. по формуле (6.3,6)

$$t_c = 300 + 116 \sqrt{5 - 4,5} = 328 \text{ } ^\circ\text{C или } 655 \text{ К}$$

Пр и м е р 2. Рассчитать температуру самовоспламенения изопропилового спирта.

Решение.

Исходя из структурной формулы вещества, определим количество цепей



$M_P = 3$, так как в молекуле содержится две группы $-\text{CH}_3$ И одна группа $-\text{OH}$

Находим длину каждой цепи и среднюю длину

m_i	1-3	3-4	1-4
C_i	2+1	2+1	3

В цепях 1-3 и 3-4 содержится по два атома углерода и одна группа $-\text{OH}$, которая удлиняет цепь на один атом углерода

$$l_{CP} = \frac{3 \cdot 6}{3} = 3$$

По приложению находим, что температура самовоспламенения изопропилового спирта равна 706 К; по формуле (6.10)

$$t_c = 300 + 116 \sqrt{5 - 3} = 464 \text{ } ^\circ\text{C или } 737 \text{ К}$$

согласно справочным данным, температура самовоспламенения равна 693К

Относительная ошибка расчета с использованием таблицы составляет

$$\Delta = \frac{706 - 693}{693} 100 = 1,9\%$$

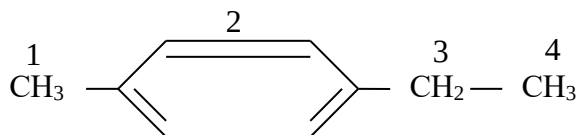
Если расчет вести по формуле (4.10), она возрастает до

$$\Delta = \frac{737 - 693}{693} 100 = 6,3\%$$

Пример 3. Определить температуру самовоспламенения вещества 1-метил-4-этилбензола.

Решение.

Структурная формула вещества



$M_P = 3$, так как в молекуле две метильные и одна фенильная группы.

Определим длину цепей

m_i	1-4	1-2	2-4
C_i	3-1	1-1	2-1

Длина цепи уменьшается на один атом углерода, так как в нее входит фенильная группа

$$l_{CP} = \frac{1 \cdot 2 + 1 \cdot 0 + 1 \cdot 1}{3} = 1,0$$

По справочным данным определяем, что температура самовоспламенения равна 712 К.

5. Вопросы и задания

Рассчитать стандартную температуру самовоспламенения *i*-го вещества. Сравнить расчетное значение с имеющимися справочными данными и определить относительную ошибку расчета.

Номер варианта	Вещество	
	Предельный углеводород	Ароматический углеводород
1	4, 4 - диметилгептан	1, 2 - диметилбензол
2	Изопентан	1, 3 - диметилбензол
3	2, 3 - диметилоктан	1, 4 - диметилбензол
4	3 - метилгексан	1, 2, 3 - триметилбензол
5	2, 3 - диметилпентан	1, 2, 4 - триметилбензол
6	2 - метилбутан	1, 3, 5 - триметилбензол
7	2, 4 - диметилгексан	Толуол
8	2, 2, 4 - триметилбутан	о-Ксилол
9	2, 4 - диметилпентан	м-Ксилол
10	Изобутан	п-Ксилол
11	2, 2 - диметилбутан	1, 2 - диметилбензол
12	2, 2 - диметилпентан	1, 3 - диметилбензол
13	Тетраметилметан	1, 4 - диметилбензол
14	2, 4, 6 - триметилнонан	1, 2, 3 - триметилбензол
15	1, 3, 5, 7 - тетраметилнонан	1, 2, 4 - триметилбензол
16	4, 4 - диметилгептан	1, 3, 5 - триметилбензол
17	Изопентан	Толуол
18	2, 3 - диметилоктан	о-Ксилол
19	3 - метилгексан	м-Ксилол
20	2, 3 - диметилпентан	п-Ксилол
21	2 - метилбутан	1, 2 - диметилбензол
22	2, 4 - диметилгексан	1, 3 - диметилбензол
23	2, 2, 4 - триметилбутан	1, 4 - диметилбензол
24	2, 4 - диметилпентан	1, 2, 3 - триметилбензол
25	Изобутан	1, 2, 4 - триметилбензол
26	2, 2 - диметилбутан	1, 3, 5 - триметилбензол
27	2, 2 - диметилпентан	Толуол
28	Тетраметилметан	о-Ксилол
29	2, 4, 6 - триметилнонан	м-Ксилол
30	1, 3, 5, 7 - тетраметилнонан	п-Ксилол

6. Список литературы, рекомендуемый к использованию по данной теме

Основная литература

1. Кукин, П. П. Теория горения и взрыва : учебное пособие / П. П. Кукин, В. В. Юшин, С. Г. Емельянов ; Юго-Западный гос. ун-т, Рос. гос. технолог. ун-т им. К. Э. Циолковского (МАТИ-РГТУ). – М. : Юрайт, 2015. – 435 с. : ил., табл. – (Бакалавр). – Гриф: Доп. УМО. – Библиогр.: с. 433-435. – ISBN 978-5-9916-2722-1

2. Теория горения и взрывов [Электронный ресурс] : практикум / . — Электрон. текстовые данные. — Новосибирск: Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики, 2015. — 97 с. — 2227-8397. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/55503.html>

Дополнительная литература

1. Девисилов, В. А. Теория горения и взрыва : практикум : учеб. пособие для вузов / В.А. Девисилов, Т.И. Дроздова, С.С. Тимофеева. — Москва : ФОРУМ, 2012. — 351 с. : ил. ; 22. — (Высшее образование). — Гриф: Рек. УМО. — Библиогр.: с. 286-287. — ISBN 978-5-91134-555-6

2. Горев В.А. Теория горения и взрыва [Электронный ресурс] : учебное пособие / В.А. Горев. — Электрон. текстовые данные. — М. : Московский государственный строительный университет, ЭБС АСВ, 2010. — 200 с. — 2227-8397. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/16330.html>

3. Матерова С.И. Химия процессов горения [Электронный ресурс] : учебное пособие / С.И. Матерова. — Электрон. текстовые данные. — Железногорск: Сибирская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, 2017. — 63 с. — 2227-8397. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/66930.html>

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ 16

Потенциал горючести

1. Целью практического занятия является изучить классификацию веществ и материалов по горючести освоить способ расчета потенциала горючести химических веществ; уметь оценивать флегматизирующую и огнетушащую эффективность химически активных ингибиторов, инертных газов.

2. В результате освоения темы практического занятия студенты приобретают следующие умения и навыки, формируемые компетенции: способен определять круг задач в рамках поставленной цели и выбирать оптимальные способы их решения, исходя из действующих правовых норм, имеющихся ресурсов и ограничений (УК-2); способен учитывать современные тенденции развития техники и технологий в области техносферной безопасности, измерительной и вычислительной техники, информационных технологий при решении типовых задач в области профессиональной деятельности, связанной с защитой окружающей среды и обеспечением безопасности человека (ОПК-1).

3. Актуальность темы: овладение методами расчета параметров пожарной опасности веществ необходимо для практической деятельности студентов.

4. Теоретическая часть

Потенциал горючести является наиболее комплексным показателем горючести вещества. С его помощью можно сравнить степень горючести газов и паров, рассчитывать состав смесей с заданной горючестью, оценивать флегматизирующую и огнетушащую эффективность химически активных ингибиторов, инертных газов.

Потенциал горючести представляет собой избыточную (со знаком минус) или не достаточную (со знаком плюс) энергию, заключенную в горючей системе, по условиям.

Потенциал горючести, отнесенный к некоторым условиям горения, называется приведенным потенциалом горючести.

Из определения следует если:

$\Delta H_p < 0$ – смесь горючая;

$\Delta P_{г} > 0$ – смесь не является горючей;

$\Delta P_{г} = 0$ – смесь предельна по горючести.

Для многокомпонентных смесей:

$$\Delta P_{г,см} = \sum_{i=1}^n \mu_i \Delta P_{г,i} \quad (11.1)$$

где $\Delta P_{г,см}$ – потенциал горючести смеси газов и паров, кДж/моль;

$\Delta P_{г,i}$ – потенциал горючести i - того компонента смеси, кДж/моль;

μ_i – мольная доля i - того компонента смеси;

Примеры решения задач.

Пример №1. Определить, является ли горючей смесь содержащая 30% окиси углерода, 40% метана, 25% двуокиси углерода и 5% паров 1,2-дибромтетраафторатана (фреон 1,1,4 в2).

Решение: Согласно условиям (11.1) горючесть индивидуальных веществ и их смесей в воздухе определяется знаком потенциала горючести. Поэтому по формуле (5.2) и табл.12 приложения определим потенциал горючести смеси:

$$\Delta P_{г,с} = 0,3(-38,0) + 0,4(-57,2) + 0,25 \cdot 16,7 + 0,05 \cdot 227 = -18,7 \text{ ккал/моль.}$$

Так как потенциал горючести отрицателен, то данная смесь газов в воздухе способна к горению.

Пример №2

Определить предельную по горючести смесь состоящую из этилена и дифторхлорбромметана.

Решение: Согласно условиям (11.1) предельной по горючести будет смесь, у которой потенциал по горючести равен 0.

Обозначим модульную долю горючего через $\mu_{г}$, тогда мольная доля ингибитора будет равна $(1 - \mu_{г})$. Согласно формуле (5.2):

$$\mu_{г} \Delta H_{г} + (1 - \mu_{г}) \Delta H_{ин} = 0.$$

С помощью табл.12 запишем: $\mu_{г} (-153) + (1 - \mu_{г}) 126 = 0$

$$\mu_{г} = \frac{126}{153 + 126} = 0,45.$$

Таким образом, смесь газов, содержащая менее чем 45% этилена и более чем 55% дифторхлорбромметана, не способна к воспламенению и горению при любом соотношении с воздухом.

Пример №3

С помощью потенциала горючести определить минимальное взрывоопасное содержание кислорода (МВСК) при разбавлении ацетоновоздушных смесей углекислым газом.

Решение:

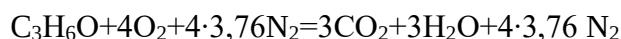
1. Согласно определению (глава 3) МВСК находят из условия определенных по горючести смеси паров и газов.

Определим состав предельной по горючести смеси содержащей пары ацетона и углекислый газ:

$$\mu_{г} = \frac{16,7}{113 + 16,7} = 0,129$$

2. Следовательно, смесь, содержащая 12,9 % паров ацетона и 87,1% двуокиси углерода, является предельной по горючести.

Установлено, что соотношение горючего и воздуха в предельных смесях близко к стехиометрическому. Находим стехиометрическую концентрацию паров ацетона в воздухе.



$$\varphi_{\text{см}} = \frac{1 \cdot 100}{1 + 4 + 4 \cdot 3,76} = 5\%.$$

Таким образом. Смесь, содержащая 5% паров ацетона и 95% воздуха является стехиометрической.

3. Согласно расчетам пп.1 и 2, находим состав трех компонентной смеси: пары ацетона- углекислый газ-воздух. Предварительно устанавливаем количество двуокиси углерода, которая перейдет со стехиометрической концентрацией ацетона:

$$\varphi_{\text{CO}_2} = \frac{5 \cdot 87,1}{12,9 - 87,1} = 33,7\%.$$

5 - φ_{CO_2}

Следовательно, 5% + 33,7% + 95% - 100%
95% - $\varphi_{\text{возд.}}$

$$\varphi_{\text{возд.}} = \frac{95 \cdot 100}{5 + 33,7 + 95} = 71,1\%.$$

Тогда содержание кислорода в предельной по горючести смеси (МВСК) будет равно:

$$\varphi_{\text{O}_2} = \frac{\varphi_{\text{O}_2}^0 \cdot \varphi_{\text{возд.}}}{100}$$

Где $\varphi_{\text{O}_2}^0$ - содержание кислорода в воздухе, %;

$$\varphi_{\text{O}_2} = \frac{21 \cdot 71,1}{100} = 14,9\%.$$

Согласно справочным данным, МВСК ацетоновоздушных смесей, разбавляемых углекислым газом, равна 14,9%.

Сравнивая полученные данные с результатами расчета МВСК по формуле (3.5), можно сделать вывод, что определение МВСК по потенциалу горючести более надежен.

5. Вопросы и задания

1. Определить, будет ли горючей смесь газов, содержащих 40% бутана, 10% паров бензола, 18% паров диметилового эфира, 20% двуокиси углерода и 12% дифтордихлорметана (фреон 12).

2. Определить состав предельной по горючести смеси, содержащей метилэтилкетон и трифторбромметан.

3. Определить минимальное взрывоопасное содержание кислорода при разбавлении бензол-воздушных смесей двуокисью углерода, парами воды, азотом, 1,2-дибромтетрафторэтаном. Сделайте вывод об эффективности разбавителей.

Домашнее задание

Определить предельную по горючести газоздушную смесь, состоящую из — того горючего вещества и — того инертного (химически активного) разбавителя. Определить минимальное взрывоопасное содержание кислорода в таких смесях, полагая, что точка флегматизации наступает при стехиометрическом соотношении горючего и окислителя. Сравнить результаты расчета с имеющимися справочными данными (табл. 11.1).

Таблица 5.1 – Варианты домашнего задания

Номер варианта	Горючее вещество	Инертный разбавитель
1	Бензол	Азот
2	Бутан	Двуокись углерода
3	Диэтиловый спирт	Хлорбромметан
4	Метиловый спирт	Тетрафторметан
5	Водород	Дифторхлорбромметан
6	Пентан	Двуокись углерода
7	Пропилен	Азот
8	Сероуглерод	Вода
9	Циклопропан	Гелий
10	Изобутилен	Двуокись углерода
11	Изобутилформиат	Дифтордихлорметан
12	Метилацетат	Азот
13	Этиловый спирт	Аргон
14	Изобутан	Бромэтан
15	Аммиак	1,2-дибромтетрафторэтан
16	Гексан	Двуокись углерода
17	Водород	Азот
18	Диметиловый эфир	Двуокись углерода
19	Этилен	Бромэтан
20	Метилформиат	1,2-дибромтетрафторэтан
21	Окись этилена	Двуокись углерода
22	Бутен-1	Двуокись углерода

6. Список литературы, рекомендуемый к использованию по данной теме

Основная литература

1. Кукин, П. П. Теория горения и взрыва : учебное пособие / П. П. Кукин, В. В. Юшин, С. Г. Емельянов ; Юго-Западный гос. ун-т, Рос. гос. технолог. ун-т им. К. Э. Циолковского (МАТИ-РГТУ). – М. : Юрайт, 2015. – 435 с. : ил., табл. – (Бакалавр). – Гриф: Доп. УМО. – Библиогр.: с. 433-435. – ISBN 978-5-9916-2722-1

2. Теория горения и взрывов [Электронный ресурс] : практикум / . — Электрон. текстовые данные. — Новосибирск: Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики, 2015. — 97 с. — 2227-8397. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/55503.html>

Дополнительная литература

1. Девисилов, В. А. Теория горения и взрыва : практикум : учеб. пособие для вузов / В.А. Девисилов, Т.И. Дроздова, С.С. Тимофеева. – Москва : ФОРУМ, 2012. – 351 с. : ил. ; 22. – (Высшее образование). – Гриф: Рек. УМО. – Библиогр.: с. 286-287. – ISBN 978-5-91134-555-6

2. Горев В.А. Теория горения и взрыва [Электронный ресурс] : учебное пособие / В.А. Горев. — Электрон. текстовые данные. — М. : Московский государственный строительный университет, ЭБС АСВ, 2010. — 200 с. — 2227-8397. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/16330.html>

3. Матерова С.И. Химия процессов горения [Электронный ресурс] : учебное пособие / С.И. Матерова. — Электрон. текстовые данные. — Железногорск: Сибирская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, 2017. — 63 с. — 2227-8397. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/66930.html>

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ 17

Расчет температуры и давления взрыва парогазовоздушных систем

1. Целью практического занятия является научиться проводить расчеты по определению температуры и давления взрыва парогазовоздушных систем.

2. В результате освоения темы практического занятия студенты приобретают следующие умения и навыки, формируемые компетенции: способен определять круг задач в рамках поставленной цели и выбирать оптимальные способы их решения, исходя из действующих правовых норм, имеющихся ресурсов и ограничений (УК-2); способен учитывать современные тенденции развития техники и технологий в области техносферной безопасности, измерительной и вычислительной техники, информационных технологий при решении типовых задач в области профессиональной деятельности, связанной с защитой окружающей среды и обеспечением безопасности человека (ОПК-1).

3. Актуальность темы: овладение методами расчета параметров пожарной опасности веществ необходимо для практической деятельности студентов.

4. Теоретическая часть

Температура взрыва – температура (зоны пламени), до которой нагреваются продукты реакции горения. Это максимальная температура зоны химической реакции (зоны пламени).

Температура взрыва определяется из уравнения теплового баланса

$$Q_n = \sum C_{pi} V_{ni} (T_{\text{в}} - T_0) \quad (12.1)$$

При этом адиабатическая температура взрыва

$$T_{\text{в}}^* = T_0 + \frac{Q_n}{\sum C_{pi} V_{ni}} \quad (12.2)$$

а действительная температура взрыва

$$T_{\text{в}} = T_0 + \frac{Q_{\text{пг}}}{\sum C_{pi} V_{ni}} \quad (12.3)$$

где $T_{\text{в}}^*$ и $T_{\text{в}}$ – соответственно адиабатическая и действительная температуры взрыва;

T_0 – начальная температура;

V_{ni} – объем i -го продукта горения;

Q_n – низшая теплота горения вещества;

$Q_{\text{пг}}$ – теплота, пошедшая на нагрев продуктов горения.

Таблица 12.1 – Расчет параметров

№	Определяемые параметры	Примечание
1	Объём и состав продуктов горения	кмоль, м ³
2	Низшая теплота сгорания или количество тепла, пошедшего на нагрев продуктов горения (при наличии теплопотерь)	Q_{n2} или Q_n кДж/кмоль, кДж/кг
3	Среднее значение энтальпии продуктов горения	$H_{\text{ср}} = \frac{Q_{n(\text{пг})}}{\sum V_{ni}} \quad (12.4)$

4	Температура горения T_1 (табл. 1,2 прил.) по средней энтальпии с помощью табл. 1 (если H_{cp} выражена в кДж/м ³), ориентируясь на азот (наибольшее содержание в продуктах горения)	
5	Теплосодержание продуктов горения с температурой T_1 (табл. 1,2 прил.)	$Q_{n2} = \sum H_i V_{n2i}$ (12.5)
6	Если $Q_{n2} < Q_{H(пг)}$, то $T_2 > T_1$ (в том случае, если $Q_{n2} > Q_{H(пг)}$, то $T_2 < T_1$)	H_i – энтальпия i -продукта горения; V_i – объём i -продукта горения
7	Q_{n2}'' по формуле (4.1.6)	
8	Расчет проводим до получения неравенства $Q_{n2}' < Q_{H(n2)} < Q_{n2}''$	
9	Температура горения	$T_r = T_1 + \frac{(Q_{H(пг)} - Q_{пг}'')(T_2 - T_1)}{Q_{пг}''' - Q_{пг}''}$ (12.6)

При этом

$$Q_{пг} = Q_H(1-\eta) \quad (12.7)$$

где η – доля теплопотерь в результате излучения энергии, химического и механического недожога.

Расчет температуры взрыва по формуле (9.2) или (9.3) может быть проведен только методом последовательных приближений, поскольку теплоемкость газов зависит от температуры горения (табл. 9.1)

Действительная температура взрыва 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 взрыва может быть значительно упрощена, если теплоемкость продуктов горения выбирать при температуре 1300 К:

$$T_{пг} = T_0 + \frac{Q_H}{\sum C_{pi}^* V_{пг}} \quad (12.8)$$

где C_{pi}^* – теплоемкость i -го продукта горения при 1500 К (таблица 12.2)

Таблица 12.2 – Теплоемкость i -го продукта горения

Вещество	Теплоёмкость	
	кДж/(м ³ ·К)	Дж/(моль·К)
CO ₂	2,27	50,85·10 ⁻³
SO ₂	2,28	51,07·10 ⁻³
H ₂ O (пар)	1,78	39,87·10 ⁻³
N ₂	1,42	31,81·10 ⁻³
Воздух	1,44	32,26·10 ⁻³

Давление при взрыве – важный фактор для расчета противовзрывной защиты аппаратов и расчета ослабленных и легкобрасываемых конструкций зданий и сооружений.

Давление при взрыве можно определить по формуле:

$$P_{взр} = \frac{P_0 \cdot T_{взр} \sum_{i=1}^n n_i}{T_0 \sum_{i=1}^m m_i} \quad (12.9)$$

где P_0 – начальное давление смеси;
 T_0 – начальная температура смеси;
 $T_{взр}$ – температура взрыва;
 $\sum_{i=1}^n n_i$ – сумма молей продуктов горения;
 $\sum_{i=1}^n m_i$ – сумма молей исходной смеси.

Пример

Пример 1. Рассчитать температуру взрыва и развиваемого давления при взрыве паров уксусной кислоты CH_3COOH в смеси с воздухом при стехиометрической концентрации при начальной температуре $25^\circ C$ и давления $101,325$ КПа.

Решение

По справочным данным (справочник Корольченко) определяем стандартную теплоту сгорания одного моля уксусной кислоты

$$\Delta H = -786500 \text{ Дж}$$

Составляем термохимическое уравнение реакции горения



Определяем разность молей продуктов горения и исходной смеси

$$n_{не} = 2 + 2 + 2 \cdot 3,76 = 11,52 \text{ моль}$$

$$n_{исх} = 1 + 2 + 2 \cdot 3,76 = 10,52 \text{ моль}$$

$$\Delta n = n_{не} - n_{исх} = 11,52 - 10,52 = 1 \text{ моль}$$

Определяем энергию взрыва

$$Q_{взр} = \Delta H - R \cdot T \Delta n$$

$$Q_{взр} = -786500 - 8,314 \cdot (273 + 25) \cdot 1 = -788977,6 \text{ Дж}$$

Определяем внутреннюю энергию продуктов взрыва, приняв начальную температуру взрыва равной $2200 K$

$$U_1 = 2 \cdot 95,062 + 2 \cdot 74,083 + 2 \cdot 3,76 \cdot 53,845 = 743,204 \text{ КДж} = 743204 \text{ Дж}$$

Внутренняя энергия продуктов взрыва оказалась меньше энергии взрыва, значит принимаем за температуру взрыва следующую большую и повторяем расчет

$$U_2 = 2 \cdot 105,727 + 2 \cdot 82,760 + 2 \cdot 3,76 \cdot 59,477 = 824,241 \text{ КДж} = 824241 \text{ Дж}$$

Внутренняя энергия продуктов взрыва оказалась выше энергии взрыва, значит температуру взрыва следует определять методом интерполяции.

Находит температуру взрыва методом линейной интерполяции

$$T_{взр} = 2200 + \frac{(2400 - 2200) \cdot (788977,6 - 743204)}{(824241 - 743204)} = 2312,97 \text{ К}$$

Определяем давление взрыва паров уксусной кислоты в смеси с воздухом при стехиометрической концентрации и при заданных условиях

$$P_{взр} = \frac{P_0 \cdot T_{взр} \sum_{i=1}^n n_i}{T_0 \sum_{i=1}^m m_i}; [KPa]$$

$$P_{взр} = \frac{101,325 \cdot 2312,97 \cdot (2 + 2 + 2 \cdot 3,76)}{(273 + 25) \cdot (1 + 2 + 2 \cdot 3,76)} = 935,96 \text{ КПа} = 9,2 \text{ атм} = 7020,3 \text{ мм.рт.ст.}$$

5. Вопросы и задания

Рассчитать температуру и давление при взрыве паров горючей жидкости при начальной температуре ... $^\circ C$ и давлении ... мм рт. ст. Концентрация стехиометрическая.

Вариант	Вещество	$T_o, ^\circ\text{C}$	$P_o, \text{мм рт.ст.}$
1	Амилбензол	10	780
2	Н-Амиловый спирт	11	760
3	Анизол	12	778
4	Анилин	15	762
5	Бутилацетат	17	776
6	Бутиловый спирт	18	764
7	Бензол	-5	774
8	Диэтиловый эфир	20	768
9	Ксилол	22	772
10	Уайт-спирит	-6	770
11	Этиленгликоль	25	740
12	Трет-Амиловый спирт	27	758
13	Гексан	5	742
14	Метиловый спирт	8	756
15	Толуол	-10	744
16	Стирол	12	754
17	Пентан	18	746
18	Этанол	4	752
19	Амилметилкетон	-6	748
20	Бутилбензол	6	750
21	Бутилвиниловый эфир	-4	769
22	Ацетон	4	779
23	Этиловый спирт	-2	749
24	Гептан	2	761
25	Октан	28	765
26	Гексан	19	759
27	Бутиловый спирт	-6	757
28	Анилин	21	769
29	Бензол	-11	770
30	Ксилол	13	754

6. Список литературы, рекомендуемый к использованию по данной теме

Основная литература

1. Кукин, П. П. Теория горения и взрыва : учебное пособие / П. П. Кукин, В. В. Юшин, С. Г. Емельянов ; Юго-Западный гос. ун-т, Рос. гос. технолог. ун-т им. К. Э. Циолковского (МАТИ-РГТУ). – М. : Юрайт, 2015. – 435 с. : ил., табл. – (Бакалавр). – Гриф: Доп. УМО. – Библиогр.: с. 433-435. – ISBN 978-5-9916-2722-1
2. Теория горения и взрывов [Электронный ресурс] : практикум / . — Электрон. текстовые данные. — Новосибирск: Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики, 2015. — 97 с. — 2227-8397. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/55503.html>

Дополнительная литература

1. Девисилов, В. А. Теория горения и взрыва : практикум : учеб. пособие для вузов / В.А. Девисилов, Т.И. Дроздова, С.С. Тимофеева. – Москва : ФОРУМ, 2012. – 351 с. : ил. ; 22. – (Высшее образование). – Гриф: Рек. УМО. – Библиогр.: с. 286-287. – ISBN 978-5-91134-555-6

2. Горев В.А. Теория горения и взрыва [Электронный ресурс] : учебное пособие / В.А. Горев. — Электрон. текстовые данные. — М. : Московский государственный строительный университет, ЭБС АСВ, 2010. — 200 с. — 2227-8397. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/16330.html>

3. Матерова С.И. Химия процессов горения [Электронный ресурс] : учебное пособие / С.И. Матерова. — Электрон. текстовые данные. — Железногорск: Сибирская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, 2017. — 63 с. — 2227-8397. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/66930.html>

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Методические указания

по выполнению лабораторных работ
по дисциплине «ТЕОРИЯ ГОРЕНИЯ И ВЗРЫВА»
для студентов направления подготовки
20.03.01 «Техносферная безопасность»
(направленность (профиль): «Пожарная безопасность»)

**Ставрополь
2026**

Введение

Лабораторный практикум реализует хорошо известный принцип «Лучше один раз увидеть, чем много раз услышать». Он охватывает все разделы курса: материальный и тепловой балансы, возникновение и распространение горения и взрыва. Отличительной особенностью всех лабораторных работ является их исследовательская направленность и комплексный теоретический и экспериментальный метод определения исследуемых параметров. Это наиболее оптимальный способ обучения, позволяющий увидеть возможности теории в решении прикладных задач. Поэтому при подготовке к лабораторным работам необходимо изучить соответствующие разделы учебных пособий: Андросов А.С., Бегишев И.Р., Салеев Е.П. «Теория горения и взрыва». М., 2007.; Андросов А.С., Салеев Е.П. «Примеры и задачи по курсу «Теория горения и взрыва». М., 2007.

Некоторые экспериментальные установки, используемые в лабораторном практикуме, отличаются от утвержденных ГОСТ тем, что они упрощены и позволяют работать на них без специальной подготовки.

Ознакомиться со стандартными методами и установками для определения показателей пожарной опасности можно по ГОСТ 12.1.044-89 «Пожаровзрывоопасность веществ и материалов». На каждое лабораторное занятие отводится по шесть часов (3 пары).

Содержание

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 1, 2	
Исследование параметров теплоты сгорания веществ	51
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 3, 4	
Исследование процессов, происходящих при горении	58
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 5, 6	
Исследование процесса горения взрывчатых веществ	64
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 7, 8	
Исследование процесса самоускорения реакции горения	72
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 9	
Исследование горения простых веществ	77
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 10	
Исследование процессов самовоспламенения	84
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 11	
Испытания на горючесть для отнесения материалов к негорючим или к горючим	88
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 12	
Испытания горючих материалов для определения их групп горючести	96
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 13	
Испытания материалов на воспламеняемость	105
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 14, 15	
Измерение критической поверхностной плотности теплового потока и времени воспламенения. Испытания материалов на распространение пламени	121
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 16	
Экспериментальное определение коэффициента дымообразования твердых веществ и материалов	129
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 17	
Экспериментальное определение показателя токсичности продуктов горения полимерных материалов	136

Лабораторная работа № 1, 2 Исследование параметров теплоты сгорания веществ

1. Цель работы

Цель работы: теоретически и экспериментально определить состав продуктов и установить предельную по горючести концентрацию кислорода.

Содержание работы: 1. Провести сжигание горючего вещества в изолированной емкости. Определив массу сгоревшего вещества, рассчитать коэффициент избытка воздуха и состав продуктов горения, исходя из химического уравнения реакции горения.

2. Методом газовой хроматографии установить состав продуктов горения, находящихся в закрытой емкости, после прекращения горения. На основании полученных данных рассчитать коэффициент избытка воздуха.

3. Сравнить расчетные и экспериментальные данные, полученные в ходе выполнения лабораторной работы, сделать выводы. Обратить внимание на полученное значение предельной по горючести концентрации кислорода, т.е. той концентрации кислорода, при которой горение исследуемого вещества в закрытой емкости прекратилось.

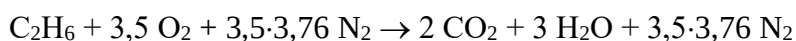
2. Формируемые компетенции или их части

Способен определять круг задач в рамках поставленной цели и выбирать оптимальные способы их решения, исходя из действующих правовых норм, имеющихся ресурсов и ограничений (УК-2); способен учитывать современные тенденции развития техники и технологий в области техносферной безопасности, измерительной и вычислительной техники, информационных технологий при решении типовых задач в области профессиональной деятельности, связанной с защитой окружающей среды и обеспечением безопасности человека (ОПК-1).

3. Теоретическая часть

Состав продуктов горения является важной характеристикой пожарной опасности веществ и материалов, так как в условиях пожара от него зависит токсичность среды, а это, в свою очередь, влияет на безопасность и здоровье людей, оказавшихся в зоне задымления.

В основе процесса горения лежит химическое взаимодействие горючего и окислителя. При горении веществ в воздухе окислителем является кислород. Азот, содержащийся в воздухе, не участвует в химическом превращении. Так как воздух содержит ~ 21 % кислорода и ~ 79 % азота, то на каждый моль кислорода в воздухе приходится 3,76 моля азота. Поэтому при составлении уравнения материального баланса процесса горения в воздухе перед азотом записывают коэффициент 3,76. Например, для этана:



Состав продуктов горения в первую очередь зависит от природы горючего вещества, т.е. его элементного состава. Например, для веществ, содержащих углерод, водород, хлор, продуктами полного окисления являются двуокись углерода, вода, хлористый водород. Кроме этого, на состав продуктов горения будут оказывать влияние условия, при которых происходит горение. В случае недостатка кислорода наряду с вышеперечисленными продуктами образуются продукты неполного окисления: окись углерода (CO) и углерод (C) в виде сажи.

Количество воздуха, необходимое для полного сгорания некоторого количества вещества, рассчитывают из уравнения материального баланса.

Отношение фактического количества воздуха, содержащегося в рассматриваемом

объеме, к расчетному, т.е. теоретически необходимому, называется коэффициентом избытка воздуха: $\alpha = \frac{V_o}{V_B^o}$.

При горении газовой смеси горючего и окислителя (кинетическое горение) с $\alpha > 1$ происходит полное окисление горючего вещества. Причем, если $\alpha > 1$ в продуктах горения содержится избыток воздуха: $\Delta V_B = V_B - V_B^o$, а, следовательно, и кислород. Если $\alpha < 1$, то в продуктах горения содержатся продукты полного и неполного окисления.

В случае диффузионного режима горения, которое чаще всего имеет место на пожаре, даже при избытке воздуха могут образовываться продукты неполного горения, так как реакция в пламени лимитируется процессом диффузии кислорода воздуха в зону горения. В закрытых помещениях горение прекращается при содержании в воздухе 14 - 17 % кислорода. При снижении в помещении концентрации кислорода уменьшается скорость его «доставки» к зоне горения, а это приводит к уменьшению скорости химической реакции, снижению температуры горения и, при определенных условиях, к прекращению горения.

Метод газовой хроматографии

Качественный и количественный анализ продуктов горения может быть проведен методом газовой хроматографии. Этот метод основан на способности веществ адсорбироваться на поверхности твердых веществ. Если в хроматографическую колонку, которая представляет собой трубку небольшого диаметра, заполненную каким-либо пористым сорбентом (вещества с большой удельной поверхностью: активированные угли, цеолиты, силикагели, ...), ввести некоторое количество индивидуального газообразного вещества и продуть ее инертным газом с постоянной скоростью, то эта порция вещества будет перемещаться по колонке с меньшей скоростью, чем инертный газ (газ-носитель). Скорость перемещения вещества по колонке будет зависеть от способности данного вещества адсорбироваться на сорбенте. Чем лучше адсорбируется вещество, тем медленнее оно будет перемещаться.

Таким образом, если в хроматографическую колонку ввести порцию смеси индивидуальных веществ, то при движении по колонке смесь разделится на индивидуальные компоненты. На рис. 1.1 показано разделение смеси, содержащей кислород, азот и двуокись углерода в хроматографической колонке, заполненной цеолитом.

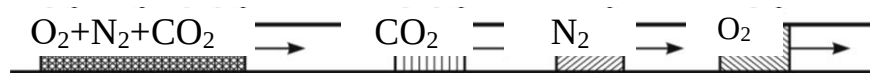


Рис. 1.1. Движение смеси газов по хроматографической колонке.

По этому рисунку можно установить, что из трех газов слабее всех на цеолите адсорбируется O_2 , а сильнее всех CO_2 .

После прохождения колонки индивидуальные компоненты вместе с газом-носителем попадают в детектор, который фиксирует изменение концентрации выходящего из колонки компонента.

Работа детектора может основываться на различных физических принципах – измерение теплопроводности, плотности ионизационного тока и др. Наиболее распространенным является детектор, регистрирующий изменение теплопроводности газа, такой детектор называется катарометром. Детектор-катарометр схематично показан на рис. 1.2. Он имеет два канала, в которых расположены чувствительные элементы – спирали из тонкой проволоки, нагретые до высокой температуры проходящим

электрическим током. По одному из каналов идет с постоянной скоростью только инертный

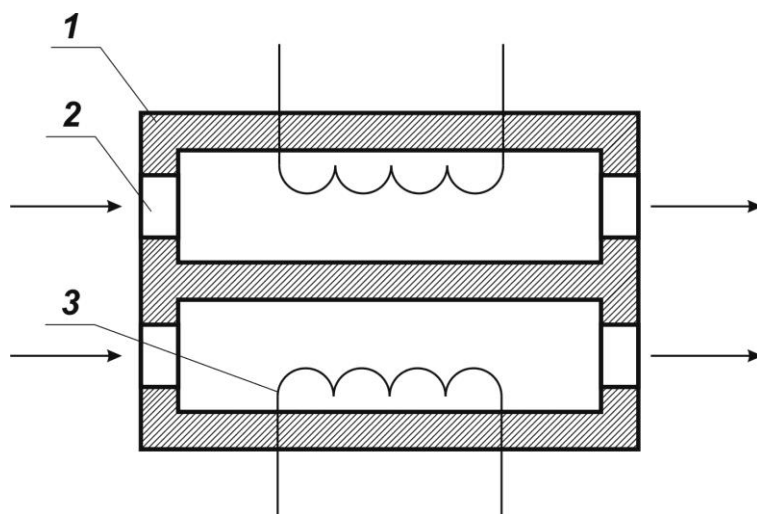


Рис. 1.2. Схема детектора-катарометра:

1 – корпус детектора; 2 – каналы для газа; 3 – чувствительные элементы.

газ газ-носитель), а по другому из хроматографической колонки поступает газ-носитель с разделенными компонентами смеси. Когда в обоих каналах находится газ-носитель, теплопроводность среды около спирали одинакова, одинакова и температура спиралей. Если во второй канал попадает какой-либо из компонентов смеси, то меняется теплопроводность газа вокруг спирали, что приводит к изменению ее температуры, а, следовательно, и к изменению сопротивления спирали. Возникает разбаланс в мостовой электрической схеме, в которую включены обе спирали. Электрический сигнал, вызванный изменением теплопроводности в канале катарометра, подается через усилитель на самописец. Чем больше концентрация вещества, проходящего через детектор, тем больше величина электрического сигнала. Электрические сигналы в виде пиков записываются на движущейся диаграммной бумаге. Полученная таким образом картина называется хроматограммой. Для смеси, содержащей O_2 , N_2 и CO_2 , хроматограмма показана на рис. 1.3.

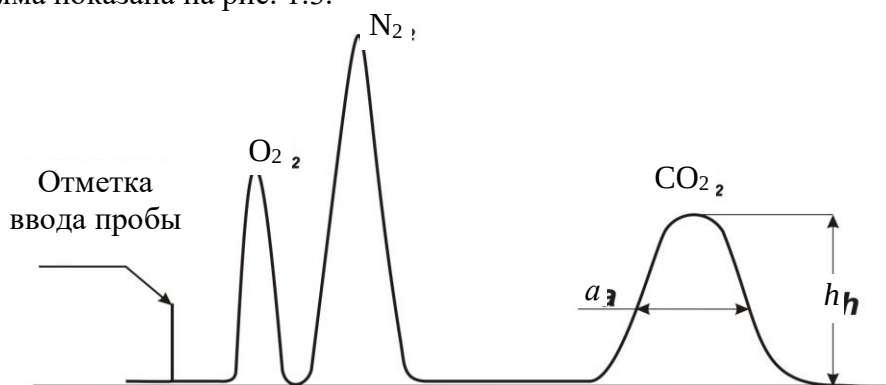


Рис. 1.3. Хроматограмма газовой смеси.

Обработка хроматограмм позволяет производить качественный и количественный анализ исследуемой смеси газов. Площадь каждого пика на хроматограмме пропорциональна количеству соответствующего компонента в анализируемой пробе. Площадь пика определяют как площадь треугольника произведением высоты пика на его ширину, измеренную на половине высоты. Например, для CO_2 (рис. 1.3) $S_{CO_2} = a h$. Для

того, чтобы сравнивать площади пиков, принадлежащих различным веществам, необходимо ввести поправки, учитывающие пропорциональность между концентрацией вещества в детекторе и величиной электрического сигнала (для катарометра зависит от теплопроводности анализируемого вещества), а также степень усиления электрического сигнала, поступающего на самописец. Необходимая степень усиления сигнала устанавливается ручкой делителя напряжения на панели хроматографа отдельно для каждого пика. Поэтому при обсчете хроматограмм для каждого вещества рассчитывают приведенные площади пиков с учетом вышеперечисленных поправок:

$$S_i^1 = K_{\text{пр}} K_y S_i, \quad (1.1)$$

где $K_{\text{пр}}$ – коэффициент пропорциональности, учитывающий различие в теплопроводности веществ; K_y – коэффициент усиления электрического сигнала.

Если отбор газовой пробы продуктов сгорания проводится при комнатной температуре, то в этой пробе практически отсутствуют пары воды, образующиеся при горении, так как они конденсируются при понижении температуры продуктов горения ниже точки кипения воды. Поэтому хроматографический анализ не может дать информацию о количестве паров воды в продуктах горения. Однако их содержание можно рассчитать косвенным методом, исходя из уравнения реакции. Например, при сгорании этана в продуктах горения на два моля образовавшейся двуокиси углерода приходится три моля воды (см. уравнение химической реакции). Таким образом, объем паров воды в продуктах горения в 1,5 раза больше объема углекислого газа. Поэтому, чтобы учесть содержание воды в продуктах горения вводят величину

$$S'_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{n_{\text{H}_2\text{O}}}{n_{\text{CO}_2}} S'_{\text{CO}_2}. \quad (1.2)$$

Тогда содержание (% об.) каждого компонента в продуктах горения определится по формуле:

$$\varphi_i = \frac{S'_i}{S_{\Sigma}} 100 \%, \quad (1.3)$$

где S_{Σ} – сумма приведенных площадей всех веществ.

$$S_{\Sigma} = S'_{\text{O}_2} + S'_{\text{N}_2} + S'_{\text{CO}_2} + S'_{\text{H}_2\text{O}}. \quad (1.4)$$

4. Оборудование и материалы

Описание лабораторной установки. Установка для определения состава продуктов горения изображена на рис. 1.4.

Фарфоровый тигель 1 с исследуемым веществом помещается на подставке 2 и герметично закрывается колоколом 3 прямоугольной формы. Колокол сделан из органического стекла, на одной его стороне закреплена эластичная компенсирующая емкость 4 (резиновый шарик), предназначенная для сохранения атмосферного давления в замкнутой емкости, так как горение будет сопровождаться изменением объема за счет протекания химической реакции и повышения температуры. На другой стороне колокола закреплено специальное устройство 5, через которое медицинским шприцем отбирается газовая проба продуктов горения. Для анализа используют газовый хроматограф, состоящий из следующих основных частей: баллона 6 с газом-носителем, регулятора расхода газа-носителя 7, устройства для ввода пробы 8, хроматографической колонки 9, детектора 10 и самопишущего прибора 11 типа КСП.

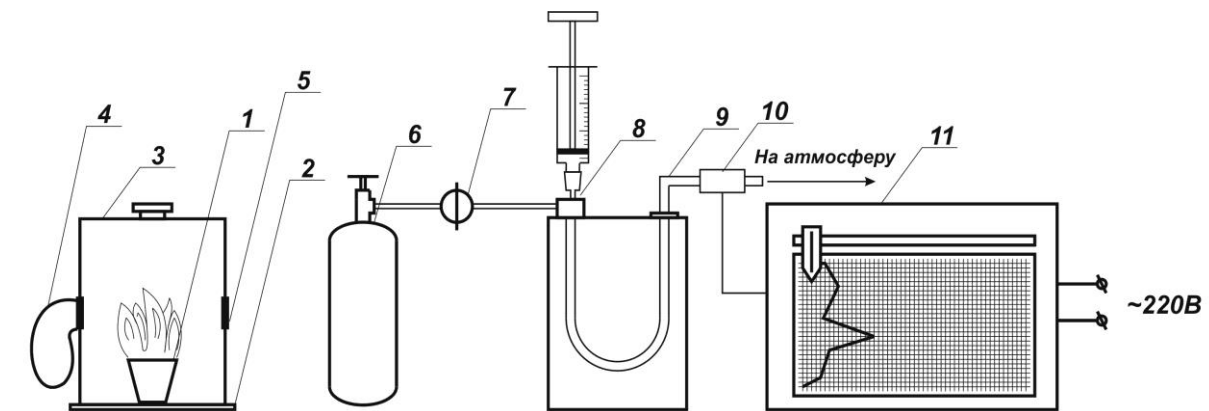


Рис. 1.4. Схема установки для определения состава продуктов горения:

- 1 – тигель с исследуемой жидкостью; 2 – подставка; 3 – колокол;
- 4 – эластичная емкость; 5 – устройство для отбора пробы;
- 6 – баллон с инертным газом; 7 – вентиль тонкой регулировки;
- 8 – устройство для ввода пробы; 9 – хроматографическая колонка;
- 10 – детектор; 11 – самопишущий прибор.

5. Указания по технике безопасности

1. При работе в лаборатории необходимо быть внимательным и соблюдать исключительную осторожность. Недостаточное знакомство с приборами и свойствами веществ, неаккуратность и отступление от правил техники безопасности и порядка проведения работы могут повлечь за собой тяжелые последствия.

Приступать к выполнению лабораторной работы разрешается только после инструктажа и соответствующей записи в журнале.

Слушатель обязан: строго соблюдать порядок выполнения работы, убрать с рабочего места все посторонние предметы, выяснить у преподавателя все возникающие в процессе работы вопросы.

2. Во избежание случайных отравлений запрещается пользоваться для питья лабораторной посудой.

3. Запрещается набирать пипеткой при помощи рта испытуемые жидкости; для этого следует пользоваться резиновой грушей.

4. Категорически запрещается сливать в канализацию огнеопасные жидкости, засорять грязью, твердыми предметами (бумага, древесина, битое стекло) раковины канализации.

5. В лаборатории категорически запрещается:

а) мыть оборудование, пол, столы бензином, керосином и другими легковоспламеняющимися и горючими жидкостями;

б) хранить тряпки, другие предметы, смоченные легковоспламеняющимися жидкостями.

6. Строго воспрещается проводить вблизи огня какие-либо работы, кроме предусмотренных описанием.

7. При пользовании газовыми горелками следует соблюдать следующие правила: чтобы зажечь горелку надо немного открыть кран, выждать 2-3 с и затем к выходному отверстию поднести пламя спички или электрозажигалки. Если от неправильного зажигания горелки пламя «проскакивает», т.е. горит внутри горелки, ее следует немедленно погасить, дать ей остыть и только после этого зажечь снова.

8. Действующие электронагревательные приборы нельзя оставлять без присмотра.

9. Все работы с легковоспламеняющимися и горючими жидкостями должны

проводиться в вытяжном шкафу или под вытяжным зонтом при работающей вентиляции.

10. Категорически запрещается нагревать на открытом огне сосуды, содержащие низкокипящие огнеопасные жидкости.

11. При нагревании ЛВЖ в количестве более 0,5 л необходимо под прибор ставить ковчету достаточной емкости для предотвращения разлива жидкости в случае аварии.

12. В случае внезапного прекращения подачи воды на охлаждение приборов с ЛВЖ и ГЖ горелки должны быть потушены, а электрический ток выключен.

13. После окончания работы необходимо проверить:

а) закрыты ли газовые и водяные краны;

б) потушены ли горелки и другие огневые приборы, выключены ли электронагревательные приборы;

в) закрыты ли пробками бутылки и банки с реактивами и другими жидкостями и материалами.

14. Необходимо ознакомиться с местом нахождения в лаборатории огнетушителя, ящика с песком, асбестополотна и др.

15. В качестве первоочередной помощи при тепловом ожоге обожженное место необходимо смочить раствором перманганата калия, затем смазать мазью от ожогов, вазелином или раствором пищевой соды (бикарбонатом натрия) и перевязать бинтом.

6. Задания

1. Исследуемую горючую жидкость наливают в тигель и взвешивают ее вместе с тиглем на весах с точностью 0,01 г.

2. Помещают тигель на подставку лабораторной установки, поджигают горючую жидкость и быстро накрывают колоколом так, чтобы горение происходило в герметичной емкости. Наблюдают за горением жидкости.

3. После прекращения горения через специальное устройство на колоколе медицинским шприцем отбирают газовую пробу продуктов горения и вводят в хроматограф.

4. После получения хроматограммы колокол снимают, повторно взвешивают тигель с оставшимся веществом и по разности масс определяют количество сгоревшей жидкости (потерю массы Δm).

5. Записав уравнение горения исследуемого вещества, проводят расчет теоретического количества воздуха V_B^o , необходимого для сгорания вещества массы Δm

$$V_B^o = \frac{(n_{O_2} + n_{N_2})V_o}{n_r M_r} \Delta m.$$

В настоящей работе для удобства рекомендуется проводить расчеты массы в граммах, а объема в литрах. В этом случае $V_o = 22,4$ л/моль, а M_r будет выражаться в г/моль.

6. Рассчитывают коэффициент избытка воздуха α , приняв практическое количество воздуха V_B равным объему камеры, в которой происходило горение

$$\alpha = \frac{V_B}{V_B^o}.$$

7. Исходя из уравнения реакции горения, рассчитывают количество образовавшихся двуокиси углерода и воды при сгорании горючего, а также количество азота и кислорода в продуктах горения

$$V_{CO_2} = \frac{n_{CO_2} V_o}{n_r M_r} \Delta m; V_{H_2O} = \frac{n_{H_2O} V_o}{n_r M_r} \Delta m; V_{N_2} = 0,79 V_B; V_{O_2} = 0,21 \Delta V_B,$$

где $\Delta V_B = V_B - V_B^o$ – избыток воздуха.

7. Содержание отчета

1.. Рассчитывают процентный состав продуктов горения и заносят полученные результаты в табл. 1.1.

Таблица 1.1

Потеря массы Δm , г	Расчетные данные по составу ПГ, % об.				Коэффициент избытка воздуха α
	CO ₂	H ₂ O	N ₂	O ₂	
	Экспериментальные данные по составу ПГ, % об.				Коэффициент избытка воздуха α
	CO ₂	H ₂ O	N ₂	O ₂	

2. Приступают к обработке данных хроматографического анализа состава продуктов горения. По хроматограмме определяют процентный состав продуктов горения. Полученные экспериментальные данные заносят в табл. 1.1.

3. Пользуясь экспериментально установленным содержанием кислорода в продуктах горения, определяют коэффициент избытка воздуха

$$\alpha = 1 + \frac{\varphi_{O_2} V_{\text{пр}}^o}{V_B^o (21 - \varphi_{O_2})},$$

где $V_{\text{пр}}^o$ - теоретический объем продуктов горения; φ_{O_2} - концентрация кислорода в продуктах горения.

4. Сравнивают расчетные и экспериментальные данные, делают выводы. Обратит внимание на полученное значение концентрации кислорода, при котором горение прекратилось.

В отчете по лабораторной работе приводят наименование вещества, химическую формулу, условия проведения опыта (температура окружающего воздуха – Т, К, атмосферное давление – Р, Па), расчет состава продуктов горения и коэффициента избытка воздуха. К отчету прилагают хроматограмму продуктов горения.

8. Контрольные вопросы

1. Какие продукты горения Вы знаете? Какие факторы оказывают влияние на состав продуктов горения?
2. Что такое коэффициент избытка воздуха и как он рассчитывается?
3. Дайте определение полного и неполного горения; в каких условиях образуются продукты неполного горения. Способны ли они в определенных условиях гореть?
4. Как влияет содержание кислорода в воздухе на способность веществ к горению? Почему?
5. Почему в замкнутом объеме горение твердых и жидких веществ прекращается при наличии определенного содержания кислорода?
6. Укажите, какой тип горения реализуется при сжигании горючей жидкости в замкнутом объеме в условиях опыта, проводимого при выполнении лабораторной работы?
7. В чем состоит сущность хроматографического метода анализа смеси веществ?
8. Как работает детектор-катарометр?
9. Почему при хроматографическом анализе не регистрируется содержание паров воды в продуктах горения?
10. Какие поправки и почему следует вводить при расчете состава продуктов горения по хроматограмме?

11. Определить количество сгоревшего вещества в закрытом объеме V , если известно, что содержание кислорода понизилось до φ_{O_2} .

12. Рассчитать количество и состав продуктов горения, образующихся при сгорании вещества массой Δm , если известны температура горения T_g и коэффициент избытка воздуха α .

9. Список литературы, рекомендуемый к использованию по данной теме

Основная литература

1. Кукин, П. П. Теория горения и взрыва : учебное пособие / П. П. Кукин, В. В. Юшин, С. Г. Емельянов ; Юго-Западный гос. ун-т, Рос. гос. технолог. ун-т им. К. Э. Циолковского (МАТИ-РГТУ). – М. : Юрайт, 2015. – 435 с. : ил., табл. – (Бакалавр). – Гриф: Доп. УМО. – Библиогр.: с. 433-435. – ISBN 978-5-9916-2722-1

2. Теория горения и взрывов [Электронный ресурс] : практикум / . — Электрон. текстовые данные. — Новосибирск: Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики, 2015. — 97 с. — 2227-8397. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/55503.html>

Дополнительная литература

1. Девисилов, В. А. Теория горения и взрыва : практикум : учеб. пособие для вузов / В.А. Девисилов, Т.И. Дроздова, С.С. Тимофеева. – Москва : ФОРУМ, 2012. – 351 с. : ил. ; 22. – (Высшее образование). – Гриф: Рек. УМО. – Библиогр.: с. 286-287. – ISBN 978-5-91134-555-6

2. Горев В.А. Теория горения и взрыва [Электронный ресурс] : учебное пособие / В.А. Горев. — Электрон. текстовые данные. — М. : Московский государственный строительный университет, ЭБС АСВ, 2010. — 200 с. — 2227-8397. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/16330.html>

3. Матерова С.И. Химия процессов горения [Электронный ресурс] : учебное пособие / С.И. Матерова. — Электрон. текстовые данные. — Железногорск: Сибирская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, 2017. — 63 с. — 2227-8397. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/66930.html>

Лабораторная работа № 3, 4

Исследование процессов, происходящих при горении

1. Цель работы

Цель работы: расчетным и экспериментальным методами изучить влияние состава горючей газовой смеси на давление взрыва.

Содержание работы: 1. Расчетным методом определить адиабатическую температуру и максимальное давление взрыва газовой смеси различного состава.

2. Экспериментально определить давление взрыва газовой смеси в замкнутом объеме.

3. По расчетным и экспериментальным результатам построить график зависимости давления взрыва от состава смеси.

4. По полученным данным сделать выводы.

2. Формируемые компетенции или их части

Способен определять круг задач в рамках поставленной цели и выбирать оптимальные способы их решения, исходя из действующих правовых норм, имеющихся ресурсов и ограничений (УК-2); способен учитывать современные тенденции развития

техники и технологий в области техносферной безопасности, измерительной и вычислительной техники, информационных технологий при решении типовых задач в области профессиональной деятельности, связанной с защитой окружающей среды и обеспечением безопасности человека (ОПК-1).

3. Теоретическая часть

При взрывном сгорании газопаровоздушной смеси (кинетический режим) в замкнутом объеме происходит повышение давления. Когда давление достигает предела прочности, наступает разрушение элементов конструкций зданий, сооружений, аппаратов.

Давление взрыва является важным параметром, который необходимо учитывать при проектировании легко сбрасываемых конструкций, предотвращающих полное разрушение зданий, прочностном расчете аппаратов, разрушающихся предохранительных мембран, клапанов и т.д.

Скорость нарастания давления пропорциональна скорости кинетического горения газовой смеси, которая может составлять от нескольких сантиметров в секунду в ламинарном режиме горения до сотен метров в секунду при турбулентном режиме.

Рост давления происходит главным образом в результате повышения температуры от начальной до температуры взрыва, т.е. до максимальной температуры продуктов реакции. Для взрывов стехиометрических и бедных смесей давление взрыва можно рассчитать по формуле

$$P_{\max} = \frac{P_o [V_{\text{пр}}^o + (\alpha - 1)V_{\text{в}}^o] T_o^{\text{вз}}}{(V_{\text{г}} + \alpha V_{\text{в}}^o) T_o}, \quad (2.1)$$

где P_o – начальное давление газовой смеси, Па, атм; T_o – начальная температура газовой смеси, К; $T_o^{\text{вз}}$ – адиабатическая температура взрыва, К; $V_{\text{пр}}^o$ – теоретический объем продуктов горения, кмоль/кмоль, м³/м³; $V_{\text{г}}$ – объем горючего, кмоль/кмоль, м³/м³; α – коэффициент избытка воздуха; $V_{\text{в}}^o$ – теоретический объем воздуха, необходимый для сгорания единицы объема горючего, кмоль/кмоль, м³/м³.

4. Оборудование и материалы

Экспериментальная установка (рис. 2.1.) состоит из взрывного сосуда – бомбы постоянного объема 1, снабженной электродами 2 для искрового зажигания горючей смеси через высоковольтный генератор 3, подключаемый к электрической сети.

В корпус бомбы заделан датчик давления 4, который через аналоговый цифровой преобразователь 5 соединен с компьютером 6, на котором с помощью программного обеспечения показания датчика преобразуются в графическую зависимость изменения давления в сосуде во времени – $P = f(\tau)$.

Сосуд через краны 7 и 8 соединены с атмосферой и манометром 13, через кран 9 и трехходовой кран 10 с вакуумметром 11 и вакуумным насосом 12.

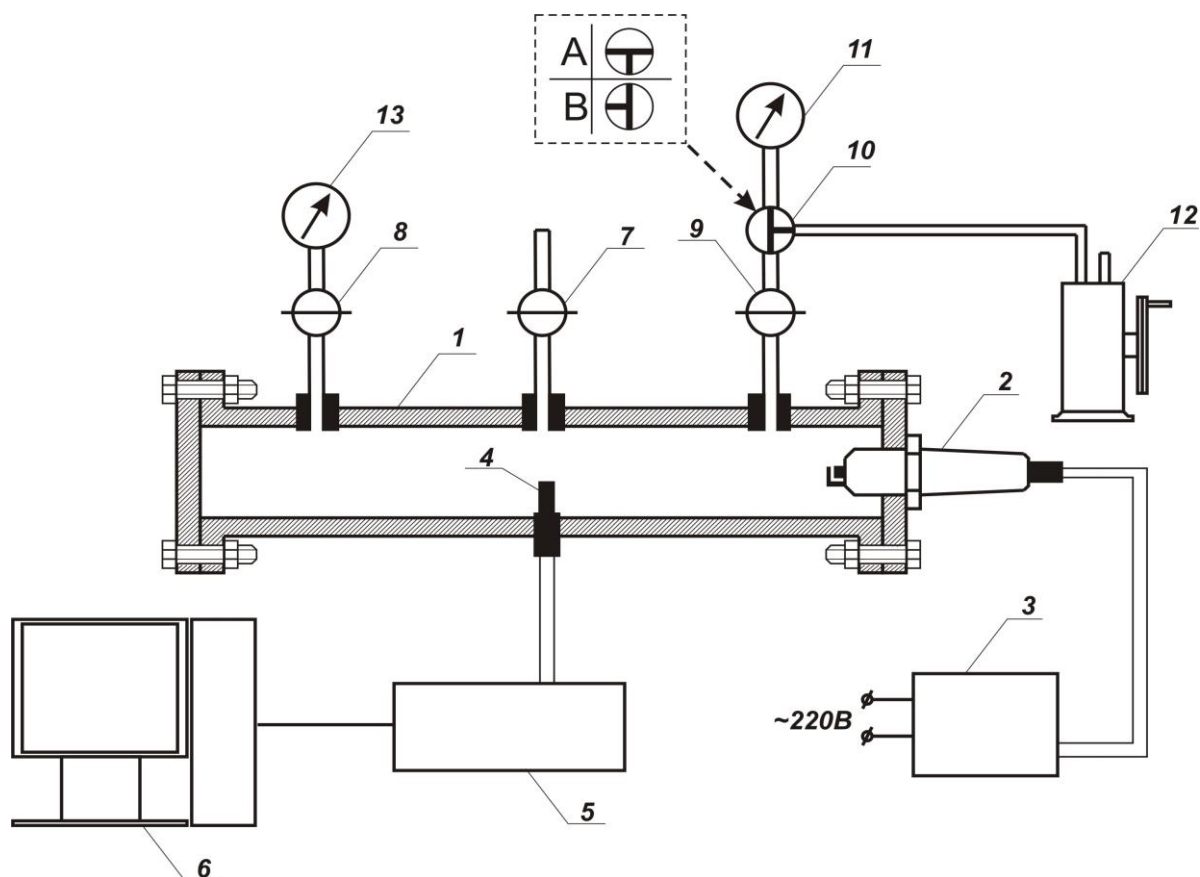


Рис. 2.1. Схема экспериментальной установки:

- 1 – взрывной сосуд; 2 – электроды зажигания; 3 – генератор;
 4 – датчик давления; 5 – аналогово-цифровой преобразователь;
 6 – компьютер; 7, 8, 9 – краны; 10 – трехходовой кран;
 11 – вакуумметр; 12 – вакуумный насос; 13 – манометр.

А – сосуд соединен с вакуумным насосом;

В – сосуд соединен в вакуумметром

5. Указания по технике безопасности

1. При работе в лаборатории необходимо быть внимательным и соблюдать исключительную осторожность. Недостаточное знакомство с приборами и свойствами веществ, неаккуратность и отступление от правил техники безопасности и порядка проведения работы могут повлечь за собой тяжелые последствия.

Приступать к выполнению лабораторной работы разрешается только после инструктажа и соответствующей записи в журнале.

Слушатель обязан: строго соблюдать порядок выполнения работы, убрать с рабочего места все посторонние предметы, выяснить у преподавателя все возникающие в процессе работы вопросы.

2. Во избежание случайных отравлений запрещается пользоваться для питья лабораторной посудой.

3. Запрещается набирать пипеткой при помощи рта испытуемые жидкости; для этого следует пользоваться резиновой грушей.

4. Категорически запрещается сливать в канализацию огнеопасные жидкости, засорять грязью, твердыми предметами (бумага, древесина, битое стекло) раковины канализации.

5. В лаборатории категорически запрещается:

- а) мыть оборудование, пол, столы бензином, керосином и другими

легковоспламеняющимися и горючими жидкостями;

б) хранить тряпки, другие предметы, смоченные легковоспламеняющимися жидкостями.

6. Строго воспрещается проводить вблизи огня какие-либо работы, кроме предусмотренных описанием.

7. При пользовании газовыми горелками следует соблюдать следующие правила: чтобы зажечь горелку надо немного открыть кран, выждать 2-3 с и затем к выходному отверстию поднести пламя спички или электрозажигалки. Если от неправильного зажигания горелки пламя «проскакивает», т.е. горит внутри горелки, ее следует немедленно погасить, дать ей остыть и только после этого зажечь снова.

8. Действующие электронагревательные приборы нельзя оставлять без присмотра.

9. Все работы с легковоспламеняющимися и горючими жидкостями должны проводиться в вытяжном шкафу или под вытяжным зонтом при работающей вентиляции.

10. Категорически запрещается нагревать на открытом огне сосуды, содержащие низкокипящие огнеопасные жидкости.

11. При нагревании ЛВЖ в количестве более 0,5 л необходимо под прибор ставить кювету достаточной емкости для предотвращения разлива жидкости в случае аварии.

12. В случае внезапного прекращения подачи воды на охлаждение приборов с ЛВЖ и ГЖ горелки должны быть потушены, а электрический ток выключен.

13. После окончания работы необходимо проверить:

а) закрыты ли газовые и водяные краны;

б) потушены ли горелки и другие огневые приборы, выключены ли электронагревательные приборы;

в) закрыты ли пробками бутылки и банки с реактивами и другими жидкостями и материалами.

14. Необходимо ознакомиться с местом нахождения в лаборатории огнетушителя, ящика с песком, асбестополотна и др.

15. В качестве первоочередной помощи при тепловом ожоге обожженное место необходимо смочить раствором перманганата калия, затем смазать мазью от ожогов, вазелином или раствором пищевой соды (бикарбонатом натрия) и перевязать бинтом.

6. Задания

1. Заполняется таблица исходных данных.

Таблица 2.1

№ п/п	Параметр	Значение параметра
1	Горючий газ	C_4H_{10}
2	Концентрация газа в воздухе, % об.	стехиометрической (3,1 %) и бедной (2,0 %)
3	Начальная температура, °C	700 °C
4	Атмосферное давление, Па	нормальное

Горючий газ и его концентрация в воздухе задаются преподавателем, температура и атмосферное давление определяются по соответствующим приборам в лаборатории.

2. Расчетная часть.

2.1. Расчет объема продуктов горения и коэффициента избытка воздуха.

При сгорании стехиометрической смеси, коэффициент избытка воздуха $\alpha = 1$, по этому объем продуктов горения равен теоретическому, т.е:

$$V_{\text{пр}} = V_{\text{пр}}^0. \quad (2.2)$$

При сгорании бедных смесей, когда $\alpha > 1$

$$V_{\text{пт}} = V_{\text{пт}}^0 + \Delta V_{\text{в}}, \quad (2.3)$$

где $\Delta V_{\text{в}}$ – избыток воздуха.

$$\Delta V_{\text{в}} = V_{\text{в}}^0 (\alpha - 1) \quad (2.4)$$

Коэффициент избытка воздуха при известной концентрации горючего ($\varphi_{\text{г}}$) определяется по уравнению

$$\alpha = \frac{100 - \varphi_{\text{г}}}{\varphi_{\text{г}} V_{\text{в}}^0}. \quad (2.5)$$

2.2. Расчет адиабатической температуры взрыва газозооушной смеси проводится из уравнения теплового баланса

Точное значение $T_{\text{вз}}^0$ рассчитывают методом последовательных приближений, используя значения внутренней энергии продуктов горения (табл.1 приложения)

Приблизенно $T_{\text{вз}}^0$ можно рассчитать по уравнению

$$T_{\text{вз}}^0 = T_0 + \frac{Q_{\text{н}}}{\sum C_{vi} V_{\text{пти}}}, \quad (2.6)$$

где C_{vi} – теплоемкость при постоянном объеме i -го продукта взрыва, кДж/(моль·К).

2.3. Задание. Рассчитать давление взрыва бутанозоушных смесей. Если по п. 2.2 при расчете температуры взрыва получены соответствующие значения для стехиометрии 2200 °С и для бедной смеси 1300 °С.

7. Содержание отчета

Результаты расчета заносятся в таблицу.

Таблица 2.2

№ п/п	Концентрация горючего в воздухе, % об.	Адиабатическая температура взрыва, °С	Давление взрыва, атм
1			
2			
3			

Концентрация горючего газа ($\varphi_{\text{г}}$) во взрывном сосуде равна

$$\varphi_{\text{г}} = \frac{P_{\text{г}}}{P_0} \cdot 100, \quad (2.7)$$

где $P_{\text{г}}$ – давление газа в сосуде, Па; P_0 – атмосферное давление, Па.

Из выражения (2.7) по заданному значению концентрации (табл. 2.1) определяется требуемое давление горючего газа

$$P_{\text{г}} = \frac{\varphi_{\text{г}} P_0}{100}. \quad (2.8)$$

Результаты заносятся в таблицу экспериментальных данных.

Таблица 2.3

№ п/п	Концентрация горючего в бомбе, % об.	Давление горючего газа в бомбе, Па	Максимальное давление по показаниям прибора (давление взрыва), Па
1			
2			
3			

Опыт проводится в следующем порядке.

3.1. В положении А трехходового крана 10 и закрытом кране 8 проводится четырехкратное вакуумирование сосуда 1 с периодическим открыванием и закрыванием крана 7, тем самым сосуд освобождается от продуктов взрыва.

3.2. При закрытом кране 7 в сосуде создается разрежение и кран 10 переводится в положение В – соединяется с вакуумметром, показания которого отмечаются.

3.3. К крану 7 подключается сосуд с горючим газом и при его медленном открывании запускается требуемое количество газа:

$$P_r = P_k - P_n, \quad (2.9)$$

где P_n – начальное показание вакуумметра, Па; P_k – конечное показание вакуумметра, Па.

3.4. Перекрывается кран 9, отсоединяется от крана 7 сосуд с газом и кран 7 открывается на атмосферу.

3.5. Закрывается кран 7, включается кнопка искрового разрядника 3, газовоздушная смесь воспламеняется. Изменение давления в сосуде фиксируется на мониторе компьютера 6. Давление взрыва смеси данной концентрации заносится в табл. 2.2.

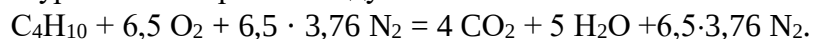
3.6. Приступают к следующему опыту с другой концентрацией горючего в последовательности пп. 3.1-3.5.

По данным табл. 2.2 и 2.3 строится график зависимости давления взрыва от концентрации горючего в газовоздушной смеси.

8. Контрольные вопросы

1. Что называется взрывом?
2. За счет каких факторов в замкнутом объеме возрастает давление?
3. Рассчитайте давление в сосуде при взрыве горючего газа А стехиометрической концентрации и охлаждении продуктов до начальной температуры.
4. Как изменится давление взрыва при добавлении в горючую смесь инертного газа?
5. Как изменится давление взрыва при замене воздуха на кислород?
6. При какой концентрации горючего А давление взрыва будет максимально:
в воздухе,
в кислороде?
7. Укажите интервал концентраций газа А в воздухе при воздействии источника зажигания, давление не будет изменяться.

2.3. Задание. Рассчитать давление взрыва проводится по уравнению (2.1). Например, рассчитать давление взрыва бутановоздушных смесей: стехиометрической (3,1 %) и бедной (2,0 %) концентрации. Предположим, что в п. 2.2 при расчете температуры взрыва получены соответствующие значения для стехиометрии 2200 °С и для бедной смеси 1300 °С. Из уравнения горения следует:



Для стехиометрии:

$$\alpha = 1; V_r = 1 \text{ кмоль/кмоль}; V_{\text{шт}}^o = 4 + 5 + 6,5 \cdot 3,76 = 33,44 \text{ кмоль/кмоль}; V_v^o = 6,5 + 6,5 \cdot 3,76 = 30,94 \text{ кмоль/кмоль}.$$

Для бедной смеси с концентрацией бутана 2 % об.:

$$\alpha = \frac{100 - 2}{2 \cdot 30,94} = 1,58;$$

$$\Delta V_v = 30,94 \cdot (1,58 - 1) = 17,94 \text{ кмоль/кмоль};$$

$$V_{\text{шт}} = 33,44 + 17,94 = 51,38 \text{ кмоль/кмоль}.$$

Давление взрыва для стехиометрической смеси:

$$P_{\text{стех}} = \frac{1 \cdot 33,44 \cdot (2200 + 273)}{(1 + 1 \cdot 6,5 \cdot 4,76)(20 + 273)} = 8,8 \text{ атм.}$$

Давление взрыва для бедной смеси:

$$P_{\text{бед}} = \frac{1 \cdot 51,38 \cdot (1300 + 273)}{(1 + 1,58 \cdot 6,5 \cdot 4,76)(20 + 273)} = 5,5 \text{ атм.}$$

9. Список литературы, рекомендуемый к использованию по данной теме

Основная литература

1. Кукин, П. П. Теория горения и взрыва : учебное пособие / П. П. Кукин, В. В. Юшин, С. Г. Емельянов ; Юго-Западный гос. ун-т, Рос. гос. технолог. ун-т им. К. Э. Циолковского (МАТИ-РГТУ). – М. : Юрайт, 2015. – 435 с. : ил., табл. – (Бакалавр). – Гриф: Доп. УМО. – Библиогр.: с. 433-435. – ISBN 978-5-9916-2722-1
2. Теория горения и взрывов [Электронный ресурс] : практикум / . — Электрон. текстовые данные. — Новосибирск: Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики, 2015. — 97 с. — 2227-8397. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/55503.html>

Дополнительная литература

1. Девисилов, В. А. Теория горения и взрыва : практикум : учеб. пособие для вузов / В.А. Девисилов, Т.И. Дроздова, С.С. Тимофеева. – Москва : ФОРУМ, 2012. – 351 с. : ил. ; 22. – (Высшее образование). – Гриф: Рек. УМО. – Библиогр.: с. 286-287. – ISBN 978-5-91134-555-6
2. Горев В.А. Теория горения и взрыва [Электронный ресурс] : учебное пособие / В.А. Горев. — Электрон. текстовые данные. — М. : Московский государственный строительный университет, ЭБС АСВ, 2010. — 200 с. — 2227-8397. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/16330.html>
3. Матерова С.И. Химия процессов горения [Электронный ресурс] : учебное пособие / С.И. Матерова. — Электрон. текстовые данные. — Железногорск: Сибирская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, 2017. — 63 с. — 2227-8397. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/66930.html>

Лабораторная работа № 5, 6

Исследование процесса горения взрывчатых веществ

1. Цель работы

Цель работы: экспериментальным и расчетным методами изучить изменение КПП от содержания негорючих газов-флегматизаторов в парогазовоздушной смеси.

Содержание работы: 1. Расчетными методами определить:

значения нижнего (НКПП) и верхнего (ВКПП) пределов распространения пламени; минимальную флегматизирующую концентрацию (МФК) инертного газа; концентрацию горючего газа в точке флегматизации.

2. Экспериментально определить значения НКПП при различных содержаниях негорючего газа.

3. По расчетным и экспериментальным данным построить график зависимости КПП от содержания флегматизатора.

4. По полученным результатам исследования сделать выводы.

2. Формируемые компетенции или их части

Способен определять круг задач в рамках поставленной цели и выбирать оптимальные способы их решения, исходя из действующих правовых норм, имеющихся ресурсов и ограничений (УК-2); способен учитывать современные тенденции развития техники и технологий в области техносферной безопасности, измерительной и

вычислительной техники, информационных технологий при решении типовых задач в области профессиональной деятельности, связанной с защитой окружающей среды и обеспечением безопасности человека (ОПК-1).

3. Теоретическая часть

Горючие газы и пары с окислителем имеют два предела по концентрации: нижний и верхний концентрационные пределы распространения пламени. Нижний (верхний) предел – минимальная (максимальная) концентрация горючего, способная воспламениться от источника зажигания и распространению горения. Концентрации горючего, расположенные между НКПР и ВКПР, образуют область пожароопасных концентраций. Условие пожаровзрывоопасности:

$$\varphi_n \leq \varphi_r \leq \varphi_v, \quad (3.1)$$

где φ_r – концентрация горючего, %; φ_n , φ_v – соответственно НКПР и ВКПР, %.

КПР являются важнейшими показателями пожарной опасности веществ и подлежат обязательному определению.

В соответствии с теоретическими представлениями при введении в парогазовоздушную смесь негорючих азотов (CO_2 , N_2 и др.) или химически активных ингибиторов ($\text{C}_2\text{F}_4\text{Br}_2$ и др.) концентрационная область распространения пламени сужается: верхний предел понижается, нижний – возрастает (рис. 3.1).

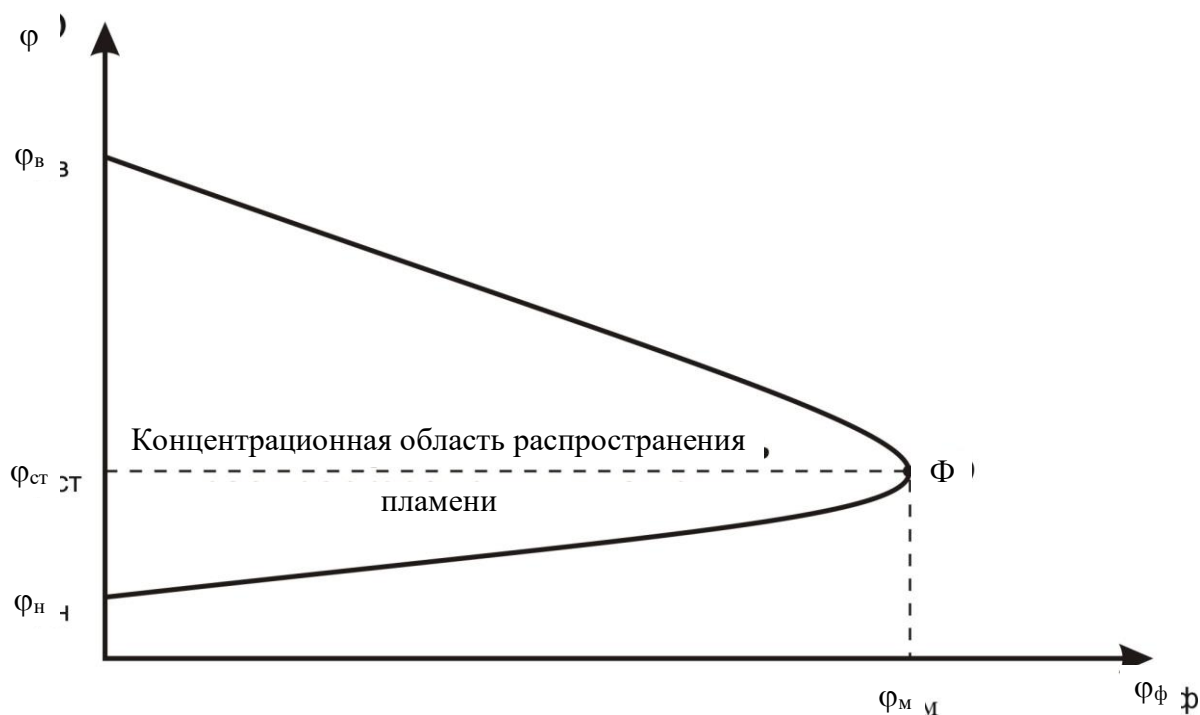


Рис. 3.1. Влияние флегматизаторов на концентрационные пределы:

φ – точка флегматизации;

φ_m – минимальная флегматизирующая концентрация (МФК)

При введении некоторого количества флегматизатора пределы смыкаются, образуя точку флегматизации – предельную по горючести смесь. Такая концентрация инертного газа или химически активного ингибитора называется минимальной флегматизирующей концентрацией. Концентрация кислорода в точке флегматизации называется минимальным взрывоопасным содержанием кислорода (МВСК).

4. Оборудование и материалы

Экспериментальная установка

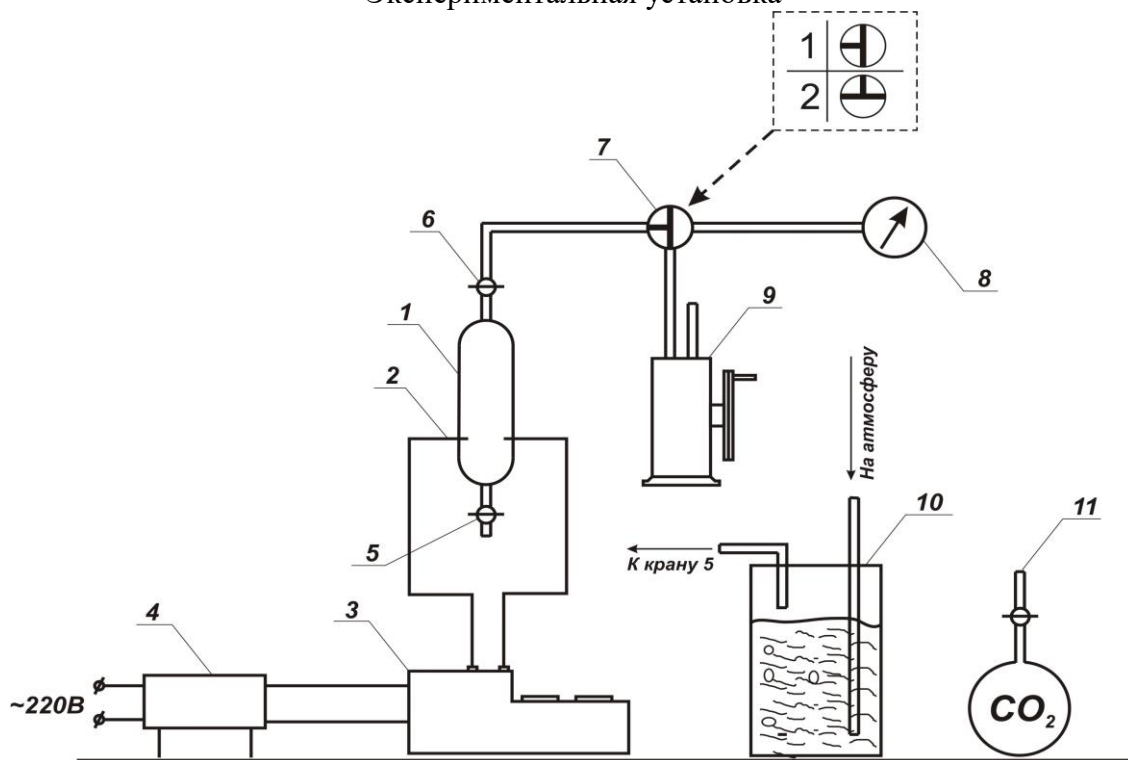


Рис. 3.2. Схема экспериментальной установки

1 – взрывная пипетка; 2 – электроды зажигания; 3 – генератор; 4 – выпрямитель;
5, 6 – краны; 7 – трехходовой кран; 8 – вакуумметр; 9 – вакуумный насос;
10 – емкость с горючей жидкостью; 11 – емкость с инертным газом.

Экспериментальная установка состоит из взрывной пипетки 1 с впаянными электродами 2, которые через высоковольтный генератор 3 и выпрямитель 4 соединены с электрической сетью. Нижний конец пипетки с помощью крана 5 соединяется с атмосферой, а верхний ее конец через кран 6 и трехходовой кран 7 с вакуумметром 8 и вакуумным насосом 9. Испытуемая жидкость заливается в сосуд 10, флегматизатор (двуокись углерода) хранится в резиновой камере.

Концентрация газов во взрывной пипетке 1 определяется с помощью вакуумметра 8, шкала которого, разделенная на 100 делений, составляет одну техническую атмосферу или 735 мм рт. ст., или 98000 Па. Таким образом, одно деление шкалы вакуумметра составляет 980 Па.

5. Указания по технике безопасности

1. При работе в лаборатории необходимо быть внимательным и соблюдать исключительную осторожность. Недостаточное знакомство с приборами и свойствами веществ, неаккуратность и отступление от правил техники безопасности и порядка проведения работы могут повлечь за собой тяжелые последствия.

Приступать к выполнению лабораторной работы разрешается только после

инструктажа и соответствующей записи в журнале.

Слушатель обязан: строго соблюдать порядок выполнения работы, убрать с рабочего места все посторонние предметы, выяснить у преподавателя все возникающие в процессе работы вопросы.

2. Во избежание случайных отравлений запрещается пользоваться для питья лабораторной посудой.

3. Запрещается набирать пипеткой при помощи рта испытуемые жидкости; для этого следует пользоваться резиновой грушей.

4. Категорически запрещается сливать в канализацию огнеопасные жидкости, засорять грязью, твердыми предметами (бумага, древесина, битое стекло) раковины канализации.

5. В лаборатории категорически запрещается:

а) мыть оборудование, пол, столы бензином, керосином и другими легковоспламеняющимися и горючими жидкостями;

б) хранить тряпки, другие предметы, смоченные легковоспламеняющимися жидкостями.

6. Строго воспрещается проводить вблизи огня какие-либо работы, кроме предусмотренных описанием.

7. При пользовании газовыми горелками следует соблюдать следующие правила:

чтобы зажечь горелку надо немного открыть кран, выждать 2-3 с и затем к выходному отверстию поднести пламя спички или электрозажигалки. Если от неправильного зажигания горелки пламя «проскакивает», т.е. горит внутри горелки, ее следует немедленно погасить, дать ей остыть и только после этого зажечь снова.

8. Действующие электронагревательные приборы нельзя оставлять без присмотра.

9. Все работы с легковоспламеняющимися и горючими жидкостями должны проводиться в вытяжном шкафу или под вытяжным зонтом при работающей вентиляции.

10. Категорически запрещается нагревать на открытом огне сосуды, содержащие низкокипящие огнеопасные жидкости.

11. При нагревании ЛВЖ в количестве более 0,5 л необходимо под прибор ставить кювету достаточной емкости для предотвращения разлива жидкости в случае аварии.

12. В случае внезапного прекращения подачи воды на охлаждение приборов с ЛВЖ и ГЖ горелки должны быть потушены, а электрический ток выключен.

13. После окончания работы необходимо проверить:

а) закрыты ли газовые и водяные краны;

б) потушены ли горелки и другие огневые приборы, выключены ли электронагревательные приборы;

в) закрыты ли пробками бутылки и банки с реактивами и другими жидкостями и материалами.

14. Необходимо ознакомиться с местом нахождения в лаборатории огнетушителя, ящика с песком, асбестополотна и др.

15. В качестве первоочередной помощи при тепловом ожоге обожженное место необходимо смочить раствором перманганата калия, затем смазать мазью от ожогов, вазелином или раствором пищевой соды (бикарбонатом натрия) и перевязать бинтом.

6. Задания

1. Заполняется таблица исходных данных.

Таблица 3.1

№ п/п	Параметр	Значения параметра
1	Горючее	Метан в воздухе
2	Инертный газ – флегматизатор	Диоксид углерода
3	Концентрации флегматизатора, % об.	

4	Атмосферное давление, Па	
5	Температура окружающей среды, °С	273 К
6	Давление насыщенных паров над поверхностью горючей жидкости при температуре окружающей среды, Па	

Параметры горючего, флегматизатора, его концентрации и давления насыщенных паров горючей жидкости задаются преподавателем, атмосферное давление и температура в лаборатории определяются по соответствующим приборам.

2. Расчетная часть.

2.1. КПР горючих паров или газов в воздухе можно рассчитать по аппроксимационной формуле

$$\varphi_{н(в)} = \frac{100}{a n + b}, \quad (3.2)$$

где a , b – эмпирические коэффициенты (табл. 3.2); n – стехиометрический коэффициент при кислороде в уравнении горения. Например, для метана $n = 2$, $\text{CH}_4 + 2\text{O}_2 = \text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$.

Таблица 3.2

№ п/п	Концентрационные пределы	Значение коэффициентов	
		a	b
1	НКПР	8,68	4,68
2	ВКПР		
	$n \leq 7,5$	1,55	0,56
	$n > 7,5$	0,77	6,55

2.2. Минимальная флегматизирующая концентрация (МФК) негорючего газа рассчитывается из уравнения теплового баланса при следующих условиях:

адиабатическая температура горения является предельной и составляет ~1500 К;

в точке флегматизации соотношение горючего и окислителя стехиометрическое при окислении углерода до CO , а водорода до H_2O . Например, для горения метана в воздухе при разбавлении диоксидом углерода (CO_2)



Левая часть уравнения представляет собой стехиометрическую смесь горючего и воздуха с негорючим газом. Правая часть – продукты горения при окислении углерода до CO .

Из закона Гесса следует:

$$Q_n = \Delta H_{\text{CO}} + 2 \Delta H_{\text{H}_2\text{O}} = 112,7 + 2 \cdot 242,2 - 75,0 = 522,1 \text{ кДж/моль},$$

где ΔH_{CO} и $\Delta H_{\text{H}_2\text{O}}$ – соответственно энтальпия образования окиси углерода (112,7 кДж/моль) и паров воды (242,2 кДж/моль) и метана (75,0 кДж/моль).

Тепловой баланс:

$$Q_n = \sum C_{pi} V_{pi} (T_r^0 - T_0) = 597,1, \quad (3.3)$$

где $\sum V_{pi} = \sum V_{pi}^0 + V_{\phi}$.

Из уравнения (3.3) можно рассчитать количество негорючего газа для достижения точки флегматизации:

$$V_{\phi} = \frac{Q_n - (T_r^0 - T_0) \sum C_{pi} V_{pi}^0}{(T_r^0 - T_0) C_{p\phi}}, \quad (3.4)$$

где T_r° – предельная адиабатическая температура горения (1500 К); T_o – начальная температура, К; C_{pi} – теплоемкость i -го продукта горения при постоянном объеме (табл. 3.3) среднее значение в температурном интервале 273-1500 К, кДж/(моль·К); $C_{рф}$ – теплоемкость флегматизатора при постоянном объеме, кДж/(моль·К); V_{pi}° – теоретический объем i -го продукта горения, кмоль/моль; V_ϕ – объем флегматизатора, соответствующий минимальной флегматизирующей концентрации (МФК), кмоль/кмоль.

Таблица 3.3

№ п/п	Вещество	Химическая формула	Теплоемкость C_{pi}	
			кДж/(м ³ ·К)	кДж/(моль·К)
1	Диоксид углерода	CO ₂	2,27	5,08·10 ⁻²
2	Диоксид серы	SO ₂	2,28	5,11·10 ⁻²
3	Оксид углерода	CO	1,42	3,18·10 ⁻²
4	Вода (пар)	H ₂ O	1,78	3,99·10 ⁻²
5	Азот	N ₂	1,42	3,18·10 ⁻²
6	Воздух	0,21O ₂ +0,79 N ₂	1,44	3,23·10 ⁻²

Можно рассчитать состав предельной по горючести смеси в точке флегматизации, приняв:

$$(V_r + V_{O_2} + V_{N_2} + V_\phi) \quad (3.5)$$

за 100 %, тогда

$$\varphi_i = \frac{V_i}{V_r + V_{O_2} + V_{N_2} + V_\phi} \cdot 100. \quad (3.6)$$

7. Содержание отчета

Результаты расчета заносятся в таблицу.

Таблица 3.4

№ п/п	Расчетный параметр	Значение параметра
1	НКПР, %	
2	ВКПР, %	
3	Минимальная флегматизирующая концентрация (МФК), %	
4	Концентрация горючего в точке флегматизации, %	

Экспериментальное определение КПР производится путем нахождения предельных концентраций, еще способных к воспламенению и распространению горения.

Концентрация газов (флегматизатора – φ_ϕ), горючего (φ_r) определяется их парциальным давлением

$$\varphi_{r(\phi)} = \frac{P_{r(\phi)}}{P_o} \cdot 100 = \frac{Z_{r(\phi)} \cdot 980}{P_o} \cdot 100, \quad (3.7)$$

где $P_{r(\phi)}$ – парциальное давление соответственно горючего газа или флегматизатора, Па; P_o – атмосферное давление, Па; $Z_{r(\phi)}$ – количество делений, на которое отклонилась стрелка вакуумметра при введении газообразных соответственно горючего или флегматизатора.

Часто горючим является жидкость, концентрационные пределы паров которой надо определить. В этом случае во взрывную пипетку поступают насыщенные пары горючего определенной концентрации ($\phi_{\text{нп}}$) с воздухом.

Концентрация паров горючего во взрывной пипетке

$$\phi_{\text{г}} = \frac{\phi_{\text{нп}} P_{\text{г}}}{P_{\text{о}}}, \quad (3.8)$$

где $\phi_{\text{нп}}$ – концентрация насыщенного пара; $P_{\text{г}}$ – парциальное давление паровоздушной смеси во взрывной пипетке, Па.

Так как $P_{\text{г}} = Z_{\text{г}} \cdot 980$, а $\phi_{\text{нп}} = \frac{P_{\text{нп}}}{P_{\text{о}}} \cdot 100$, то, подставляя в уравнение (3.8), получим

формулу для расчета концентрации паров горючей жидкости во взрывной пипетке:

$$\phi_{\text{г}} = \frac{Z_{\text{г}} \cdot 980 \cdot P_{\text{нп}}}{P_{\text{о}}^2} \cdot 100. \quad (3.9)$$

Экспериментальная установка состоит из взрывной пипетки 1 с впаянными электродами 2, которые через высоковольтный генератор 3 и выпрямитель 4 соединены с электрической сетью. Нижний конец пипетки с помощью крана 5 соединяется с атмосферой, а верхний ее конец через кран 6 и трехходовой кран 7 с вакуумметром 8 и вакуумным насосом 9. Испытуемая жидкость заливается в сосуд 10, флегматизатор (двуокись углерода) хранится в резиновой камере.

Концентрация газов во взрывной пипетке 1 определяется с помощью вакуумметра 8, шкала которого, разделенная на 100 делений, составляет одну техническую атмосферу или 735 мм рт. ст., или 98000 Па. Таким образом, одно деление шкалы вакуумметра составляет 980 Па.

Опыты проводятся по следующей схеме.

1. Закрывают нижний кран 5 на взрывной пипетке, открывают кран 6, а краном 7 соединяют пипетку с вакуумным насосом (положение 1).

2. С помощью вакуумного насоса прокачивают взрывную пипетку 1, периодически (3-4 раза) соединяя ее краном 5 с атмосферой. Тем самым пипетка освобождается от продуктов горения или от несгоревшей смеси.

3. При предыдущем положении крана 7 и закрытом кране 5 в пипетке создается разрежение (7-8 оборотов вакуумного насоса) и с помощью крана 7 пипетка соединяется с вакуумметром 8 (положение 2). При этом показания вакуумметра не должны изменяться во времени. Если происходит падение разрежения, то необходимо определить место подсоса воздуха и обеспечить герметичность системы.

4. К нижнему концу взрывной пипетки подсоединяется с помощью резинового шланга сосуд с исследуемой жидкостью 10 и, медленно открывая кран 5, в пипетку впускается расчетное количество насыщенных паров жидкости. Отсчет количества введенных паров жидкости определяется по шкале вакуумметра. Затем кран 5 перекрывается, сосуд 10 отсоединяют от пипетки и подключают камеру с флегматизатором 11. Открывают кран на камере, затем, медленно открывая кран 5, вводят расчетное количество флегматизатора.

5. Перекрывают кран 5, кран на камере с флегматизатором, отсоединяют камеру от пипетки и с помощью крана 6 отключают взрывную пипетку от вакуумметра и вакуумного насоса.

6. Краном 5 соединяют взрывную пипетку 1 с атмосферой. С помощью кнопки включения генератора 3 производят искровой разряд на электродах 2. Положение крана 5 должно быть открытое.

7. Визуально фиксируется наличие или отсутствие воспламенения. При отсутствии воспламенения концентрацию горючего повышают на одно деление вакуумметра, а при его наличии, наоборот, понижают. Опыты повторяют до тех пор, пока при данном количестве флегматизатора две смеси, различающиеся только на одно деление вакуумметра, воспламеняются и не воспламеняются.

8. За НКПР принимают среднее значение между этими величинами. Результаты заносятся в табл. 3.5.

Таблица 3.5

№ п/п	Содержание флегматизатора		Содержание горючего		Результат испытания	Значение НКПР
	$\varphi_{\text{ф}}, \%$	$Z_{\text{а}}$	$Z_{\text{г}}$	$\varphi_{\text{г}}, \%$		$\varphi_{\text{н}}, \%$

По данным табл. 3.4 и 3.5 строится график зависимости КПР от содержания флегматизатора, определяется область распространения пламени (рис. 3.1).

8. Контрольные вопросы

1. Что называется концентрационными пределами распространения пламени, областью распространения пламени?
2. Какие факторы влияют на концентрационные пределы? Поясните графически.
3. С позиций молекулярно-кинетической теории объясните влияние флегматизаторов на НКПР и ВКПР.
4. Какие существуют методы расчета КПР? Проиллюстрируйте примерами расчета.
5. По результатам работы установите, будет ли взрывоопасной концентрация паров жидкости в воздухе $\varphi_{\text{г}}$, содержащем φ флегматизатора?
6. Рассчитайте коэффициент избытка воздуха горючей смеси на НКПР и ВКПР.
7. Покажите графически зависимость температуры горения при изменении концентрации горючего от НКПР до ВКПР.
8. Рассчитайте концентрацию вещества А в точке флегматизации при разбавлении паровоздушной смеси флегматизатором В.
9. Определите, будет ли взрывоопасна паровоздушная смесь, если в герметичном объеме V испарилось Q кг вещества А? Пары равномерно распределены по объему.
10. Определите максимальное (минимальное) количество вещества А, при испарении которого в герметичном объеме V будет создаваться взрывоопасная концентрация. Пары равномерно распределены по объему.
11. Будет ли взрывоопасна паровоздушная смесь у поверхности жидкости А, если температура ее T , а атмосферное давление P_0 ?
12. Будет ли взрывоопасна смесь, образовавшаяся в результате смешения объема V_1 газа А и объема V_2 газа В с объемом воздуха V_0 ? Газы А и В горючие.
13. Рассчитайте минимальный объем инертного газа $V_{\text{ф}}$, необходимый для флегматизации паров вещества А в объеме V_0 ?
14. Какие свойства флегматизатора определяют его эффективность?
15. Будет ли взрывоопасна смесь вещества А с воздухом, если при разбавлении ее флегматизатором В содержание кислорода в смеси понизилось до $\varphi_{\text{O}_2} \%$?

Для метановоздушной смеси, разбавленной диоксидом углерода:

$$V_{\text{ф}} = \frac{597,1 - (1500 - 273) \cdot (3,18 \cdot 1 + 3,99 \cdot 2 + 3,18 \cdot 1,5 \cdot 3,76) \cdot 10^{-2}}{(1500 - 273) \cdot 5,08 \cdot 10^{-2}} = 3,8 \text{ кмоль/кмоль.}$$

Можно рассчитать состав предельной по горючести смеси в точке флегматизации, приняв:

$$(V_{\Gamma} + V_{O_2} + V_{N_2} + V_{\Phi}) \quad (3.5)$$

за 100 %, тогда

$$\varphi_i = \frac{V_i}{V_{\Gamma} + V_{O_2} + V_{N_2} + V_{\Phi}} \cdot 100. \quad (3.6)$$

Для метановоздушной смеси, разбавленной диоксидом углерода, состав в точке флегматизации:

$$\varphi_{CO_2(МФК)} = \frac{3,8}{1 + 1,5 + 1,5 \cdot 3,76 + 3,8} \cdot 100 = 31,8 \%$$

$$\varphi_{CH_4} = \frac{1}{1 + 1,5 + 1,5 \cdot 3,76 + 3,8} \cdot 100 = 8,4 \%$$

$$\varphi_{O_2(МВСК)} = \frac{1,5}{1 + 1,5 + 1,5 \cdot 3,76 + 3,8} \cdot 100 = 12,6 \%$$

$$\varphi_{N_2} = \frac{1,5 \cdot 3,76}{1 + 1,5 + 1,5 \cdot 3,76 + 3,8} \cdot 100 = 47,2 \%$$

9. Список литературы, рекомендуемый к использованию по данной теме

Основная литература

1. Кукин, П. П. Теория горения и взрыва : учебное пособие / П. П. Кукин, В. В. Юшин, С. Г. Емельянов ; Юго-Западный гос. ун-т, Рос. гос. технолог. ун-т им. К. Э. Циолковского (МАТИ-РГТУ). – М. : Юрайт, 2015. – 435 с. : ил., табл. – (Бакалавр). – Гриф: Доп. УМО. – Библиогр.: с. 433-435. – ISBN 978-5-9916-2722-1

2. Теория горения и взрывов [Электронный ресурс] : практикум / . — Электрон. текстовые данные. — Новосибирск: Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики, 2015. — 97 с. — 2227-8397. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/55503.html>

Дополнительная литература

1. Девисилов, В. А. Теория горения и взрыва : практикум : учеб. пособие для вузов / В.А. Девисилов, Т.И. Дроздова, С.С. Тимофеева. – Москва : ФОРУМ, 2012. – 351 с. : ил. ; 22. – (Высшее образование). – Гриф: Рек. УМО. – Библиогр.: с. 286-287. – ISBN 978-5-91134-555-6

2. Горев В.А. Теория горения и взрыва [Электронный ресурс] : учебное пособие / В.А. Горев. — Электрон. текстовые данные. — М. : Московский государственный строительный университет, ЭБС АСВ, 2010. — 200 с. — 2227-8397. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/16330.html>

3. Матерова С.И. Химия процессов горения [Электронный ресурс] : учебное пособие / С.И. Матерова. — Электрон. текстовые данные. — Железногорск: Сибирская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, 2017. — 63 с. — 2227-8397. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/66930.html>

Лабораторная работа № 7, 8

Исследование процесса самоускорения реакции горения

1. Цель работы

Цель работы: исследовать влияние содержания воды в горючей жидкости на

температуру вспышки.

Содержание работы: 1. Расчетным методом определить температуру вспышки чистой (100 %) горючей жидкости.

2. Экспериментально определить температуру вспышки водных растворов этой жидкости.

3. По расчетным и экспериментальным результатам построить график зависимости температуры вспышки жидкости от ее концентрации.

4. По полученным результатам сделать выводы.

2. Формируемые компетенции или их части

Способен определять круг задач в рамках поставленной цели и выбирать оптимальные способы их решения, исходя из действующих правовых норм, имеющихся ресурсов и ограничений (УК-2); способен учитывать современные тенденции развития техники и технологий в области техносферной безопасности, измерительной и вычислительной техники, информационных технологий при решении типовых задач в области профессиональной деятельности, связанной с защитой окружающей среды и обеспечением безопасности человека (ОПК-1).

3. Теоретическая часть

Над поверхностью жидкости всегда присутствуют ее пары, концентрация которых в воздухе зависит от температуры жидкости: с ростом температуры концентрация паров возрастает, достигая при температуре кипения 100 %. Минимальная температура жидкости, при которой в условиях специальных испытаний пары горючей жидкости воспламеняются от источника зажигания без дальнейшего перехода горения жидкости в диффузионный режим, называется температурой вспышки.

Таким образом, при температуре вспышки паровоздушная смесь над поверхностью горючей жидкости становится пожаровзрывоопасной. По этой причине температура вспышки является одним из основных показателей пожаровзрывоопасности жидкостей, который подлежит обязательному определению для любой горючей жидкости. Температуру вспышки определяют в приборах двух типов: закрытом (з.п.) и открытом (о.п.). Понятно, что температура вспышки, определенная в закрытом приборе, ниже, чем в открытом.

По температуре вспышки жидкости классифицируются на легковоспламеняющиеся (температура вспышки в з.п. 61 °С и ниже, или 66 °С и ниже в о.п.) и горючие.

4. Оборудование и материалы

Экспериментальная установка

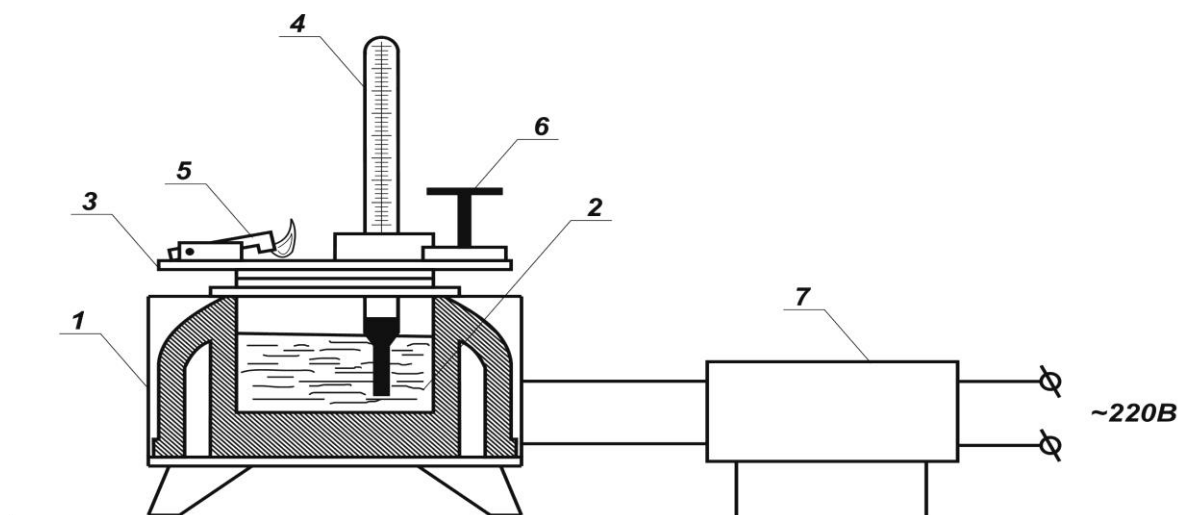


Рис. 4.1. Схема экспериментальной установки:

1 – корпус; 2 – тигель; 3 – крышка; 4 – термометр; 5 – запальный фитиль;
6 – пружинный рычаг; 7 – трансформатор

5. Указания по технике безопасности

1. При работе в лаборатории необходимо быть внимательным и соблюдать исключительную осторожность. Недостаточное знакомство с приборами и свойствами веществ, неаккуратность и отступление от правил техники безопасности и порядка проведения работы могут повлечь за собой тяжелые последствия.

Приступать к выполнению лабораторной работы разрешается только после инструктажа и соответствующей записи в журнале.

Слушатель обязан: строго соблюдать порядок выполнения работы, убрать с рабочего места все посторонние предметы, выяснить у преподавателя все возникающие в процессе работы вопросы.

2. Во избежание случайных отравлений запрещается пользоваться для питья лабораторной посудой.

3. Запрещается набирать пипеткой при помощи рта испытуемые жидкости; для этого следует пользоваться резиновой грушей.

4. Категорически запрещается сливать в канализацию огнеопасные жидкости, засорять грязью, твердыми предметами (бумага, древесина, битое стекло) раковины канализации.

5. В лаборатории категорически запрещается:

а) мыть оборудование, пол, столы бензином, керосином и другими легковоспламеняющимися и горючими жидкостями;

б) хранить тряпки, другие предметы, смоченные легковоспламеняющимися жидкостями.

6. Строго воспрещается проводить вблизи огня какие-либо работы, кроме предусмотренных описанием.

7. При пользовании газовыми горелками следует соблюдать следующие правила: чтобы зажечь горелку надо немного открыть кран, выждать 2-3 с и затем к выходному отверстию поднести пламя спички или электрозажигалки. Если от неправильного зажигания горелки пламя «проскакивает», т.е. горит внутри горелки, ее следует немедленно погасить, дать ей остыть и только после этого зажечь снова.

8. Действующие электронагревательные приборы нельзя оставлять без присмотра.

9. Все работы с легковоспламеняющимися и горючими жидкостями должны проводиться в вытяжном шкафу или под вытяжным зонтом при работающей вентиляции.

10. Категорически запрещается нагревать на открытом огне сосуда, содержащие

низкокипящие огнеопасные жидкости.

11. При нагревании ЛВЖ в количестве более 0,5 л необходимо под прибор ставить кювету достаточной емкости для предотвращения разлива жидкости в случае аварии.

12. В случае внезапного прекращения подачи воды на охлаждение приборов с ЛВЖ и ГЖ горелки должны быть потушены, а электрический ток выключен.

13. После окончания работы необходимо проверить:

а) закрыты ли газовые и водяные краны;

б) потушены ли горелки и другие огневые приборы, выключены ли электронагревательные приборы;

в) закрыты ли пробками бутылки и банки с реактивами и другими жидкостями и материалами.

14. Необходимо ознакомиться с местом нахождения в лаборатории огнетушителя, ящика с песком, асбестополотна и др.

15. В качестве первоочередной помощи при тепловом ожоге обожженное место необходимо смочить раствором перманганата калия, затем смазать мазью от ожогов, вазелином или раствором пищевой соды (бикарбонатом натрия) и перевязать бинтом.

6. Задания

1. Заполняется таблица исходных данных.

Таблица 4.1

№ п/п	Параметр	Значение параметра
1	Жидкость	
2	Концентрация воды в горючей жидкости, % масс	
3	Коэффициент диффузии паров в воздухе (Д), м ² /с	

Параметры испытуемой жидкости, концентрация ее растворов задаются преподавателем, коэффициент диффузии выбирается в таблице приложения.

2. Расчетная часть.

По формуле В.И. Блинова рассчитывается температура вспышки чистой (100 %) жидкости

$$T_{\text{вс}} = \frac{A}{n D P_{\text{н.п}}}, \quad (4.1)$$

где $T_{\text{вс}}$ – температура вспышки, К; D – коэффициент диффузии паров жидкости в воздухе, м²/с; n – количество молей кислорода, необходимое для полного окисления одного моля горючего; A – постоянная прибора, 28,0 (м²·К·Па)/с; $P_{\text{н.п.}}$ – давление насыщенного пара, Па.

3. Экспериментальная часть

Экспериментальная установка (рис. 3.1) состоит из обогреваемого корпуса 1, в который помещается тигель 2 с испытуемой жидкостью. Сверху тигель закрывается крышкой 3 с термометром 4 и запальным фитилем 5. Крышка снабжена устройством для перемешивания жидкости в тигле и пружинным рычагом 6. С помощью лабораторного трансформатора 7 на клеммы корпуса подается напряжение от сети.

Экспериментальное определение $T_{\text{вс}}$ заключается в определении минимальной температуры жидкости, при которой происходит вспышка от запального фитиля.

Экспериментальное определение температуры вспышки проводится по следующей схеме.

1. Испытуемая жидкость заливается в тигель 2 до уровня кольцевой риски, нанесенной на внутренней его стороне. Тигель устанавливается в корпусе и закрывается крышкой с термометром.

2. Прибор через автотрансформатор 7 подключается к электрической сети, напряжение подбирается из расчета получения скорости нагрева 5°C в минуту ($\sim 75\text{ В}$).

3. Поджигается запальный фитиль 5 и через каждые 5 градусов повышения температуры проводится испытание на вспышку. Для этого поворотом пружинного рычага 6 открывают заслонку на крышке и опускают пламя внутрь тигля на 1 - 2 с. Наименьшая температура, при которой произошла вспышка паров, принимается за ориентировочное значение температуры вспышки.

4. Для определения точного значения температуры вспышки охлаждают испытуемую жидкость на 10°C ниже ориентировочной и устанавливают скорость нагрева 1°C в минуту. Испытание на вспышку проводят при повышении температуры на каждый градус.

За температуру вспышки исследуемой жидкости принимают минимальное показание термометра, при котором появляется пламя над поверхностью жидкости.

7. Содержание отчета

Результаты заносятся в табл. 4.2.

Таблица 4.2

№ п/п	Концентрация воды в водном растворе горючей жидкости, % масс	Температура вспышки, $^{\circ}\text{C}$
1	О %	(расчетное значение)
2		
3		

По данным таблицы строится график зависимости температуры вспышки от концентрации воды в горючей жидкости.

По результатам исследования делаются выводы.

8. Контрольные вопросы

1. Что называется температурой вспышки, температурой воспламенения? Их физический смысл.

2. В чем различие между температурой вспышки и нижним температурным пределом воспламенения?

3. Укажите ориентировочное значение температурных показателей для предложенной жидкости.

4. Какие факторы влияют на величину температуры вспышки? Поясните графически.

5. Как влияет на температуру вспышки скорость ее нагрева при испытании?

6. Влияет ли на нижний и верхний температурные пределы воспламенения скорость нагрева жидкости при их определении?

7. В открытом или закрытом сосуде будет выше температура вспышки? Поясните природу явления.

8. Рассчитайте температуру вспышки в открытом тигле вещества А, если известен коэффициент диффузии его паров в воздухе.

9. Расчетным методом (по значению коэффициента диффузии паров в воздухе) определите, будет ли жидкость А относиться к ЛВЖ или ГЖ?

10. С позиций молекулярно-кинетической теории объясните влияние содержания влаги в жидкости на температуру вспышки.

11. По известным значениям концентрационных пределов воспламенения паров вещества А определите значение температурных пределов при нормальном атмосферном давлении.

12. Расчетным методом покажите, будет ли пожароопасна открытая емкость с веществом А на воздухе при температуре Т, если кратковременно воздействовать источником зажигания малой мощности?

13. Изменится ли температура вспышки при изменении концентрации кислорода в окружающей среде? Объясните природу явления.

14. Рассчитайте температуру заданной жидкости, при которой над поверхностью создается наиболее пожароопасная концентрация насыщенных паров.

9. Список литературы, рекомендуемый к использованию по данной теме

Основная литература

1. Кукин, П. П. Теория горения и взрыва : учебное пособие / П. П. Кукин, В. В. Юшин, С. Г. Емельянов ; Юго-Западный гос. ун-т, Рос. гос. технолог. ун-т им. К. Э. Циолковского (МАТИ-РГТУ). – М. : Юрайт, 2015. – 435 с. : ил., табл. – (Бакалавр). – Гриф: Доп. УМО. – Библиогр.: с. 433-435. – ISBN 978-5-9916-2722-1

2. Теория горения и взрывов [Электронный ресурс] : практикум / . — Электрон. текстовые данные. — Новосибирск: Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики, 2015. — 97 с. — 2227-8397. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/55503.html>

Дополнительная литература

1. Девисилов, В. А. Теория горения и взрыва : практикум : учеб. пособие для вузов / В.А. Девисилов, Т.И. Дроздова, С.С. Тимофеева. – Москва : ФОРУМ, 2012. – 351 с. : ил. ; 22. – (Высшее образование). – Гриф: Рек. УМО. – Библиогр.: с. 286-287. – ISBN 978-5-91134-555-6

2. Горев В.А. Теория горения и взрыва [Электронный ресурс] : учебное пособие / В.А. Горев. — Электрон. текстовые данные. — М. : Московский государственный строительный университет, ЭБС АСВ, 2010. — 200 с. — 2227-8397. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/16330.html>

3. Матерова С.И. Химия процессов горения [Электронный ресурс] : учебное пособие / С.И. Матерова. — Электрон. текстовые данные. — Железногорск: Сибирская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, 2017. — 63 с. — 2227-8397. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/66930.html>

Лабораторная работа № 9 **Исследование горения простых веществ**

1. Цель работы

Цель работы: экспериментально установить зависимость температуры самовоспламенения от концентрации горючего вещества.

Содержание работы: 1. Рассчитать температуру самовоспламенения исследуемого вещества по средней длине углеродной цепи.

2. Используя полученное значение температуры самовоспламенения, провести пересчет заданных значений концентрации горючего (% об.) в паровоздушной смеси в объемы вводимой жидкости.

3. Экспериментально на лабораторной установке определить температуру самовоспламенения горючей смеси при трех заданных значениях концентрации паров горючей жидкости.

4. По экспериментальным данным построить зависимость температуры самовоспламенения от концентрации паров горючего, сравнить полученные данные с расчетным значением.

2. Формируемые компетенции или их части

Способен определять круг задач в рамках поставленной цели и выбирать оптимальные способы их решения, исходя из действующих правовых норм, имеющихся ресурсов и ограничений (УК-2); способен учитывать современные тенденции развития техники и технологий в области техносферной безопасности, измерительной и вычислительной техники, информационных технологий при решении типовых задач в области профессиональной деятельности, связанной с защитой окружающей среды и обеспечением безопасности человека (ОПК-1).

3. Теоретическая часть

На практике достаточно часто встречаются случаи самопроизвольного возникновения горения горючих веществ, когда горение в горючей системе возникает без внешнего источника зажигания. Такое возникновение горения в газо- и паровоздушных смесях называют самовоспламенением. Как правило, самовоспламенение в горючих газо- и паровоздушных смесях происходит при повышенных температурах, т.е. при условиях, способствующих протеканию химической реакции между горючим и окислителем.

Рассмотрим кратко причины, приводящие к возникновению горения в такой системе. Представим себе газо- или паровоздушную смесь, находящуюся при повышенной температуре, при которой в ней с заметной скоростью происходит экзотермическая реакция. Тепло, выделяющееся в горючей системе в результате химической реакции, будет приводить к ее саморазогреву. Чем выше температура горючей смеси, тем выше скорость химической реакции, соответственно выше скорость тепловыделения в системе. Скорость тепловыделения (q_+) пропорциональна скорости химической реакции ($W_{x.p.}$)

$$q_+ = Q W_{x.p.}, \quad (5.1)$$

где Q – тепловой эффект химической реакции.

С повышением температуры (T) в реагирующей системе увеличивается и скорость оттока тепла (q_-) в окружающую среду, которая пропорциональна разнице температур

$$q_- = \alpha \frac{S}{V} (T - T_0), \quad (5.2)$$

где α – коэффициент теплоотдачи; S – площадь поверхности теплообмена; V – объем горючей системы; T_0 – температура окружающей среды (начальная температура горючей системы).

Таким образом, повышение температуры реагирующей системы в результате ее саморазогрева в зависимости от температуры среды, окружающей систему, приводит к увеличению скорости одновременно двух процессов: тепловыделения в системе и теплоотвода из нее. Повышение температуры в системе может приводить либо к выравниванию q_+ и q_- и наступлению теплового равновесия, либо все большему расхождению между величинами q_+ и q_- , прогрессирующему саморазогреву и следующему за этим тепловому взрыву. Тепловой взрыв в горючих газо- и паровоздушных смесях приводит к самовоспламенению. Минимальная температура горючей смеси, при которой прогрессирующий саморазогрев системы приводит к тепловому взрыву и появлению пламени, называется *температурой самовоспламенения*. На практике за температуру самовоспламенения принимают минимальную температуру стенок сосуда, при которой горючая смесь, помещенная в этот сосуд, воспламеняется. Температура самовоспламенения является одним из важнейших показателей пожарной

опасности. Теория теплового взрыва, развитая академиком Н.Н. Семеновым достаточно подробно рассмотрена в учебном пособии «Теория горения и взрыва». Там же с позиций этой теории анализируется влияние различных факторов на температуру самовоспламенения.

Температуру самовоспламенения предельных углеводородов, одноатомных спиртов и ароматических соединений можно приближенно рассчитать по средней длине углеродной цепи молекулы (см. «Методические указания к решению задач по ТГиВ»).

Для экспериментального определения температуры самовоспламенения горючих жидкостей используют реакционный сосуд, представляющий собой коническую колбу из кварцевого стекла, помещенную в нагревательную печь. В нагретый сосуд с помощью микропипетки вводят определенное количество испытуемой жидкости. Жидкость в сосуде испаряется и, смешиваясь с воздухом, образует горючую паровоздушную смесь. В зависимости от температуры стенок сосуда горючая смесь либо самовоспламеняется, либо нет. Изменяя температуру стенок сосуда, находят минимальную температуру, при которой паровоздушная смесь воспламеняется, и это значение принимают за температуру самовоспламенения. Поскольку температура самовоспламенения зависит от концентрации горючего вещества в паровоздушной смеси, опыты повторяют с другим количеством испытуемой жидкости до тех пор, пока не будет установлено минимальное значение температуры самовоспламенения для данного вещества. За температуру самовоспламенения $T_{\text{св}}$ вещества принимают ее минимальное значение, полученное по результатам экспериментального исследования зависимости температуры самовоспламенения от объема вводимой жидкости (или концентрации горючего вещества). Вид такой зависимости показан на рис. 5.1. Как правило, минимальное значение температуры самовоспламенения имеют стехиометрические смеси, или смеси, близкие к стехиометрическим. Поэтому если известна химическая формула исследуемого вещества, то по уравнению горения предварительно рассчитывают стехиометрическую концентрацию вещества и определяют, какое количество жидкости необходимо ввести, чтобы в сосуде установилась концентрация, близкая к стехиометрической.

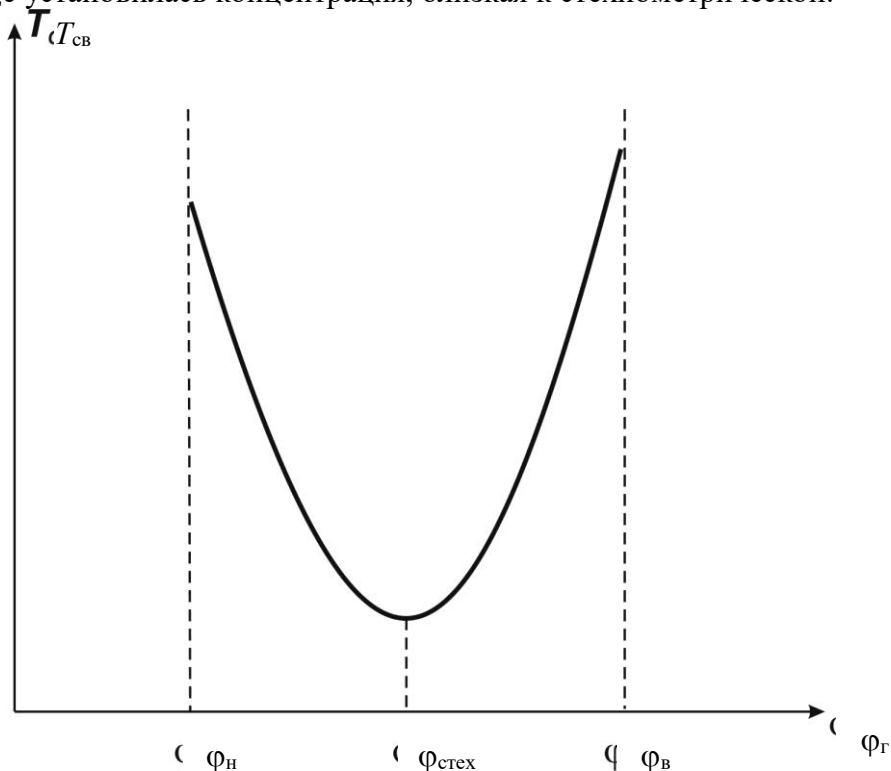


Рис. 5.1. Зависимость температуры самовоспламенения от концентрации

горючего вещества в паровоздушной смеси.

Формулу, связывающую концентрацию горючего (ϕ_r) в паровоздушной смеси в сосуде объемом V_c , нагретом до температуры $T_{св}$ с объемом вводимой жидкости $V_{ж}$, можно получить из следующих простых соображений:

$$V_{ж} = \frac{m_{ж}}{\rho_{ж}}, m_{ж} = M \frac{V_{пар}}{V_T}, V_{пар} = V_c \frac{\phi_r}{100}, V_T = V_o \frac{P_o T_{св}}{P_{атм} T_o}, \quad (5.3)$$

где $V_{ж}$ и $\rho_{ж}$ – объем и плотность вводимой горючей жидкости; M – масса одного моля горючего вещества (жидкости); $V_{пар}$ – объем паров горючей жидкости в сосуде; V_T – объем одного моля газа (пара) при условиях опыта ($T_{св}$, $P_{атм}$); $V_o = 22,4$ л/моль – объем одного моля газа (пара) при нормальных условиях ($T_o = 273$ К; $P_o = 101,3$ кПа).

Из этого следует, что

$$V_{ж} = \frac{\phi_r V_c T_o P_{атм} M}{100 \cdot V_o T_{св} P_o \rho_{ж}}. \quad (5.4)$$

Формула (5.4) позволяет рассчитывать объем горючей жидкости, который необходимо ввести в сосуд для того, чтобы в нем образовалась паровоздушная смесь с концентрацией горючего ϕ_r . И, наоборот, по известному объему вводимой горючей жидкости определять концентрацию горючего в паровоздушной смеси, образующейся в реакционном сосуде.

4. Оборудование и материалы

На рис. 5.2 приведен вид лабораторной установки для определения температуры самовоспламенения. Определение температуры самовоспламенения проводится методом «капли». Реакционный сосуд 1 представляющий собой колбу из кварцевого стекла нагревается с помощью электроспираль 2, концы которой выведены к клеммам на внешний защитный корпус сосуда 3. Внутри сосуда впаяна термопара 4 (в кварцевой трубке). Концы термопары выведены наружу. Спираль подсоединяется к автотрансформатору 5, что дает возможность регулировать напряжение, подаваемое на нее, а, следовательно, и температуру нагрева стеклянного сосуда. Провода термопары подсоединяют к пирометрическому вольтметру 6, по показаниям которого определяют температуру в сосуде. Пробу исследуемой жидкости вносят в нагретую печь микропипеткой 7.

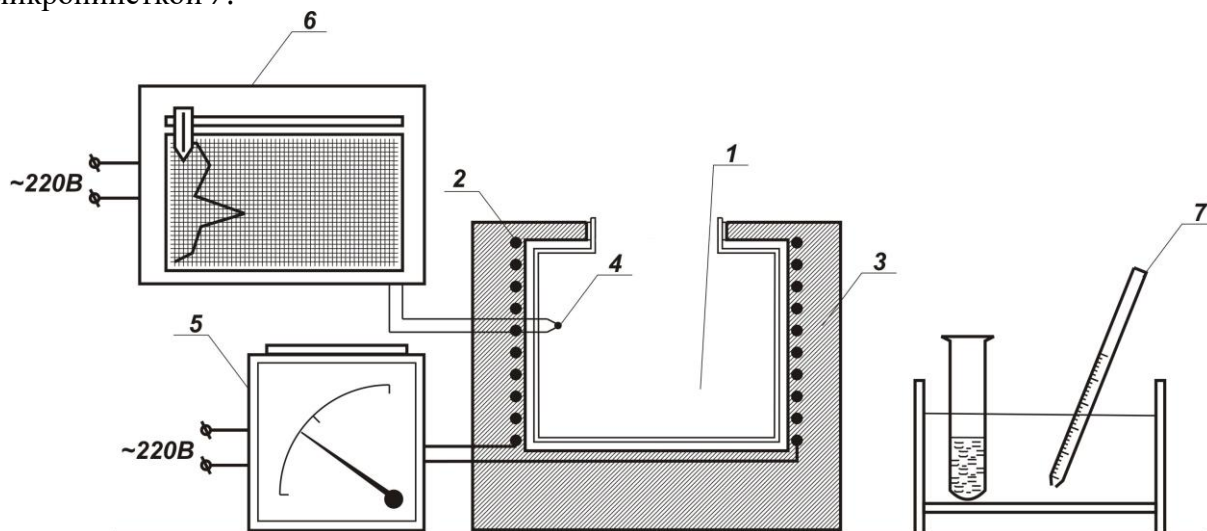


Рис. 5.2. Установка для определения температуры самовоспламенения:

1 – стеклянный реакционный сосуд; 2 – электроспираль; 3 – защитный корпус сосуда;

4 – термopapa; 5 – автотрансформатор; 6 – пирометрический милливольтметр; 7 – микропипетка.

5. Указания по технике безопасности

1. При работе в лаборатории необходимо быть внимательным и соблюдать исключительную осторожность. Недостаточное знакомство с приборами и свойствами веществ, неаккуратность и отступление от правил техники безопасности и порядка проведения работы могут повлечь за собой тяжелые последствия.

Приступать к выполнению лабораторной работы разрешается только после инструктажа и соответствующей записи в журнале.

Слушатель обязан: строго соблюдать порядок выполнения работы, убрать с рабочего места все посторонние предметы, выяснить у преподавателя все возникающие в процессе работы вопросы.

2. Во избежание случайных отравлений запрещается пользоваться для питья лабораторной посудой.

3. Запрещается набирать пипеткой при помощи рта испытуемые жидкости; для этого следует пользоваться резиновой грушей.

4. Категорически запрещается сливать в канализацию огнеопасные жидкости, засорять грязью, твердыми предметами (бумага, древесина, битое стекло) раковины канализации.

5. В лаборатории категорически запрещается:

а) мыть оборудование, пол, столы бензином, керосином и другими легковоспламеняющимися и горючими жидкостями;

б) хранить тряпки, другие предметы, смоченные легковоспламеняющимися жидкостями.

6. Строго воспрещается проводить вблизи огня какие-либо работы, кроме предусмотренных описанием.

7. При пользовании газовыми горелками следует соблюдать следующие правила: чтобы зажечь горелку надо немного открыть кран, выждать 2-3 с и затем к выходному отверстию поднести пламя спички или электрозажигалки. Если от неправильного зажигания горелки пламя «проскакивает», т.е. горит внутри горелки, ее следует немедленно погасить, дать ей остыть и только после этого зажечь снова.

8. Действующие электронагревательные приборы нельзя оставлять без присмотра.

9. Все работы с легковоспламеняющимися и горючими жидкостями должны проводиться в вытяжном шкафу или под вытяжным зонтом при работающей вентиляции.

10. Категорически запрещается нагревать на открытом огне сосуды, содержащие низкокипящие огнеопасные жидкости.

11. При нагревании ЛВЖ в количестве более 0,5 л необходимо под прибор ставить кювету достаточной емкости для предотвращения разлива жидкости в случае аварии.

12. В случае внезапного прекращения подачи воды на охлаждение приборов с ЛВЖ и ГЖ горелки должны быть потушены, а электрический ток выключен.

13. После окончания работы необходимо проверить:

а) закрыты ли газовые и водяные краны;

б) потушены ли горелки и другие огневые приборы, выключены ли электронагревательные приборы;

в) закрыты ли пробками бутылки и банки с реактивами и другими жидкостями и материалами.

14. Необходимо ознакомиться с местом нахождения в лаборатории огнетушителя, ящика с песком, асбестополотна и др.

15. В качестве первоочередной помощи при тепловом ожоге обожженное место

необходимо смочить раствором перманганата калия, затем смазать мазью от ожогов, вазелином или раствором пищевой соды (бикарбонатом натрия) и перевязать бинтом.

6. Задания

1. Получают у преподавателя задание, в котором указаны объем реакционного сосуда, на котором проводятся опыты и исследуемое вещество, а также его концентрации, для которых необходимо экспериментально определить температуру самовоспламенения.

2. Из справочных таблиц учебного пособия записывают известные физико-химические и пожароопасные свойства горючей жидкости.

3. Проводят ориентировочный расчет $T_{\text{св}}$ исследуемого вещества, руководствуясь «Методическими указаниями к решению задач по ТГиВ».

4. Ориентируясь на расчетную температуру самовоспламенения, задают необходимое напряжение на автотрансформаторе и нагревают стеклянный сосуд до температур, указанных в табл. 5.1.

5. По уравнению реакции горения вещества рассчитывают стехиометрическую концентрацию горючего в паровоздушной смеси.

Таблица 5.1

Ориентировочная температура нагрева сосудов

Номер печи	Объем реакционного сосуда, л	Температура нагрева, °С
1	1,5	300
2	1,5	300
3	1,0	350
4	0,97	350
5	0,76	450
6	0,75	450

6. По формуле (5.4) для всех заданных значений концентрации горючего рассчитывают объемы вводимой жидкости. В расчетах рекомендуется использовать следующие единицы измерения:

для массы – грамм (г), для объема – литр (л), для температуры – Кельвин (К).

7. Исходные расчетные и справочные данные записывают в табл. 5.2 и 5.3.

Таблица 5.2

Исходные данные и расчетные объемы вводимой жидкости

Исследуемое вещество, химическая формула	Объем сосуда, л	Исходные данные: M , $\rho_{\text{ж}}$, $T_{\text{св}}^{\text{ж}}$, $P_{\text{атм}}$, $\varphi_{\text{стех}}$	Заданные концентрац ии	Объем вводимой жидкости
			$\varphi_1 =$ $\varphi_2 =$ $\varphi_3 =$	$V_1 =$ $V_2 =$ $V_3 =$

Таблица 5.3

Номер опытов	Объем вводимой жидкости, л	Температура стенок сосуда	Самовоспламенение		$T_{\text{св}}$	Уточненная концентрация ГЖ при $T_{\text{см}}$
			Да	Нет		
1,1	$V_1 =$	$T_1 =$				$\varphi_1' =$
1,2		$T_2 =$				
1,3		$T_3 =$				

1,4		$T_4 =$				
2,1	$V_2 =$	$T_1 =$				$\phi'_2 =$
2,2		$T_2 =$				
2,3		$T_3 =$				
2,4		$T_4 =$				
2,5						
3,1	$V_3 =$	$T_1 =$				$\phi'_3 =$
3,2		$T_2 =$				
3,3		$T_3 =$				
3,6		$T_4 =$				

8. Знакомятся с устройством микропипетки. Определяют число делений, соответствующее заданным объемам.

9. Определяют порядок проведения опытов для трех заданных концентраций. Так как минимальная $T_{\text{св}}$ достигается при стехиометрической концентрации, то целесообразно начинать опыты с той концентрации горючей жидкости, у которой $T_{\text{св}}$ будет большей (см. рис. 5.1).

10. После достижения заданной температуры печи пипеткой набирают необходимое количество жидкости и вводят его в отверстие сосуда, и наблюдают за появлением пламени, которое может сопровождаться хлопком (взрывом). Если пламя не появилось, температуру печи необходимо повысить.

11. После появления пламени при данной концентрации горючей жидкости опыт повторяют несколько раз, снижая в каждом случае температуру на 10 °С до тех пор, пока при какой-то температуре не прекратится появление пламени. Результаты заносят в табл. 5.3.

За $T_{\text{св}}$ принимают минимальную (в каждом опыте) температуру сосуда, при которой последний раз появляется пламя.

12. В связи с тем, что концентрация горючего в паровоздушной смеси, образующейся в сосуде, зависит от температуры сосуда (см. формулу (5.4) концентрацию горючего уточняют для условий, при которых была измерена температура самовоспламенения. Для этого уравнение (5.4) преобразуют относительно $\phi_{\text{Г}}$

$$\phi_{\text{Г}} = \frac{V_{\text{ж}} 100 V_{\text{о}} T_{\text{с}} P_{\text{о}} \rho_{\text{ж}}}{V_{\text{с}} T_{\text{о}} P_{\text{атм}} M}$$

и, исходя из объема вводимой жидкости, определяют значение концентрации горючего в паровоздушной смеси при температуре самовоспламенения.

7. Содержание отчета

По результатам проведенного исследования строят графическую зависимость $T_{\text{св}}$ от концентрации горючего в паровоздушной смеси. На этом же графике откладывают значение расчетной $T_{\text{св}}$ при $\phi_{\text{Г}} = \phi_{\text{стех}}$. Записывают вывод о зависимости $T_{\text{св}}$ от концентрации горючего и о соответствии расчетных и экспериментальных значений $T_{\text{св}}$ для исследованного вещества.

8. Контрольные вопросы

1. Что называют температурой самовоспламенения?
2. Каковы необходимые и достаточные условия, чтобы горючая смесь могла самовоспламениться?
3. Является ли температура самовоспламенения константой, если нет, назовите параметры, от которых она зависит.

4. Проанализируйте влияние объема сосуда на $T_{\text{св}}$.
5. Проанализируйте влияние удельной поверхности сосуда на температуру самовоспламенения горючей смеси.
6. Как изменяются условия теплоотвода при изменении (увеличении, уменьшении) удельной поверхности сосуда, в котором находится горючая смесь?
7. Каким образом влияет на $T_{\text{св}}$ введение в горючую смесь углекислого газа, азота и т.д.?
8. Как изменится температура самовоспламенения, если изменить концентрацию горючего в паровоздушной смеси от $\varphi_{\text{н}}$ до $\varphi_{\text{стех}}$?
9. Покажите с помощью формул, при каких условиях $T_{\text{св}}$ горючей смеси с одним и тем же содержанием горючего будет больше: если сосуд имеет форму цилиндра, или он имеет форму шара, при условии, что объем сосуда остается неизменным?
10. Приведите пример, показывающий, как изменяется температура самовоспламенения в пределах гомологического ряда, основываясь на данных таблиц учебного пособия? Объясните наблюдающуюся закономерность.
11. Дайте определение периода индукции.
12. Объясните, как изменяется период индукции при увеличении начальной температуры горючей смеси?
13. Нарисуйте в координатах $q-T$ график, иллюстрирующий условия самовоспламенения горючей смеси.
14. Запишите в математической форме критические условия самовоспламенения.
15. Чем отличается явление самовоспламенения от явления самовозгорания?
16. Рассчитайте температуру самовоспламенения пропана и попанола-1 и сравните их значения. Объясните причину различия в температурах самовоспламенения.

9. Список литературы, рекомендуемый к использованию по данной теме

Основная литература

1. Кукин, П. П. Теория горения и взрыва : учебное пособие / П. П. Кукин, В. В. Юшин, С. Г. Емельянов ; Юго-Западный гос. ун-т, Рос. гос. технолог. ун-т им. К. Э. Циолковского (МАТИ-РГТУ). – М. : Юрайт, 2015. – 435 с. : ил., табл. – (Бакалавр). – Гриф: Доп. УМО. – Библиогр.: с. 433-435. – ISBN 978-5-9916-2722-1
2. Теория горения и взрывов [Электронный ресурс] : практикум / . — Электрон. текстовые данные. — Новосибирск: Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики, 2015. — 97 с. — 2227-8397. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/55503.html>

Дополнительная литература

1. Девисилов, В. А. Теория горения и взрыва : практикум : учеб. пособие для вузов / В.А. Девисилов, Т.И. Дроздова, С.С. Тимофеева. – Москва : ФОРУМ, 2012. – 351 с. : ил. ; 22. – (Высшее образование). – Гриф: Рек. УМО. – Библиогр.: с. 286-287. – ISBN 978-5-91134-555-6
2. Горев В.А. Теория горения и взрыва [Электронный ресурс] : учебное пособие / В.А. Горев. — Электрон. текстовые данные. — М. : Московский государственный строительный университет, ЭБС АСВ, 2010. — 200 с. — 2227-8397. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/16330.html>
3. Матерова С.И. Химия процессов горения [Электронный ресурс] : учебное пособие / С.И. Матерова. — Электрон. текстовые данные. — Железногорск: Сибирская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, 2017. — 63 с. — 2227-8397. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/66930.html>

Лабораторная работа № 10

Исследование процессов самовоспламенения

1. Цель работы

Цель работы: изучить зависимость скорости распространения пламени от концентрации водных растворов горючих жидкостей.

Содержание работы: 1. По эмпирическому уравнению рассчитать скорость распространения пламени по чистой (100 %) горючей жидкости.

2. Экспериментально определить скорость распространения пламени по поверхности растворов жидкости различной концентрации.

3. По расчетным и экспериментальным результатам построить график зависимости скорости распространения пламени от концентрации раствора жидкости.

4. По полученным результатам исследования сделать выводы.

2. Формируемые компетенции или их части

Способен определять круг задач в рамках поставленной цели и выбирать оптимальные способы их решения, исходя из действующих правовых норм, имеющихся ресурсов и ограничений (УК-2); способен учитывать современные тенденции развития техники и технологий в области техносферной безопасности, измерительной и вычислительной техники, информационных технологий при решении типовых задач в области профессиональной деятельности, связанной с защитой окружающей среды и обеспечением безопасности человека (ОПК-1).

3. Теоретическая часть

Скорость распространения пламени – путь, пройденный фронтом пламени по поверхности горючего материала в единицу времени. Скорость распространения является важнейшим параметром, определяющим динамику пожара и, в частности, нарастание площади пожара во времени. Скорость распространения пламени является многофакторным параметром, зависящим от вида горючего материала, его состояния (влажности, раздробленности), температуры, скорости и направления воздушных потоков и других условий, при которых протекает горение. Для конденсированных материалов (жидкость, твердое вещество) механизм распространения пламени существенно различен в зависимости от начальной температуры (T_0). При T_0 меньшей, чем температура вспышки, скорость распространения определяется мощностью теплового потока от зоны пламени на поверхность материала. При T_0 большей температуры вспышки скорость пропорциональна нормальной скорости распространения пламени по горючей паровоздушной смеси.

4. Оборудование и материалы

Экспериментальная установка

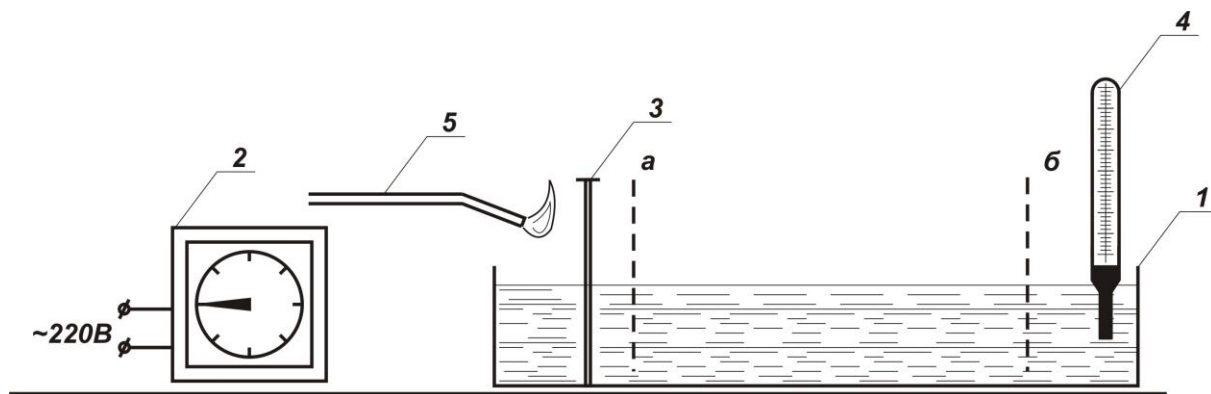


Рис. 6.1. Схема экспериментальной установки:
1 – желоб с горючей жидкостью; 2 – электросекундомер; 3 – заслонка;
4 – термометр; 5 – запальное устройство;
 $a \div б$ – контрольный участок.

5. Указания по технике безопасности

1. При работе в лаборатории необходимо быть внимательным и соблюдать исключительную осторожность. Недостаточное знакомство с приборами и свойствами веществ, неаккуратность и отступление от правил техники безопасности и порядка проведения работы могут повлечь за собой тяжелые последствия.

Приступать к выполнению лабораторной работы разрешается только после инструктажа и соответствующей записи в журнале.

Слушатель обязан: строго соблюдать порядок выполнения работы, убрать с рабочего места все посторонние предметы, выяснить у преподавателя все возникающие в процессе работы вопросы.

2. Во избежание случайных отравлений запрещается пользоваться для питья лабораторной посудой.

3. Запрещается набирать пипеткой при помощи рта испытуемые жидкости; для этого следует пользоваться резиновой грушей.

4. Категорически запрещается сливать в канализацию огнеопасные жидкости, засорять грязью, твердыми предметами (бумага, древесина, битое стекло) раковины канализации.

5. В лаборатории категорически запрещается:

а) мыть оборудование, пол, столы бензином, керосином и другими легковоспламеняющимися и горючими жидкостями;

б) хранить тряпки, другие предметы, смоченные легковоспламеняющимися жидкостями.

6. Строго воспрещается проводить вблизи огня какие-либо работы, кроме предусмотренных описанием.

7. При пользовании газовыми горелками следует соблюдать следующие правила: чтобы зажечь горелку надо немного открыть кран, выждать 2-3 с и затем к выходному отверстию поднести пламя спички или электрозажигалки. Если от неправильного зажигания горелки пламя «проскакивает», т.е. горит внутри горелки, ее следует немедленно погасить, дать ей остыть и только после этого зажечь снова.

8. Действующие электронагревательные приборы нельзя оставлять без присмотра.

9. Все работы с легковоспламеняющимися и горючими жидкостями должны проводиться в вытяжном шкафу или под вытяжным зонтом при работающей вентиляции.

10. Категорически запрещается нагревать на открытом огне сосуды, содержащие низкокипящие огнеопасные жидкости.

11. При нагревании ЛВЖ в количестве более 0,5 л необходимо под прибор ставить

кювету достаточной емкости для предотвращения разлива жидкости в случае аварии.

12. В случае внезапного прекращения подачи воды на охлаждение приборов с ЛВЖ и ГЖ горелки должны быть потушены, а электрический ток выключен.

13. После окончания работы необходимо проверить:

а) закрыты ли газовые и водяные краны;

б) потушены ли горелки и другие огневые приборы, выключены ли электронагревательные приборы;

в) закрыты ли пробками бутылки и банки с реактивами и другими жидкостями и материалами.

14. Необходимо ознакомиться с местом нахождения в лаборатории огнетушителя, ящика с песком, асбестополотна и др.

15. В качестве первоочередной помощи при тепловом ожоге обожженное место необходимо смочить раствором перманганата калия, затем смазать мазью от ожогов, вазелином или раствором пищевой соды (бикарбонатом натрия) и перевязать бинтом.

6. Задания

1. Заполняется таблица исходных данных.

Таблица 6.1

№ п/п	Параметр	Значение параметра
1	Жидкость	
2	Концентрация водного раствора жидкости, % масс.	
3	Начальная температура раствора, °С	

2. Расчетная часть. По эмпирической формуле рассчитывается скорость распространения пламени по 100 % жидкости

$$V = 0,324 \exp(0,0683 T_0 - 0,723 T_n), \text{ м/с} \quad (6.1)$$

где T_0 – начальная температура жидкости, К; T_n – нижний температурный предел распространения пламени или температура вспышки в закрытом приборе, К.

Нижний температурный предел или температура вспышки выбирается по справочным данным или рассчитывается, например, по формуле В.И. Блинова (см. лабораторную работу 5).

3. Экспериментальная часть.

Экспериментальная установка состоит из металлического желоба 1, электросекундомера 2, заслонки 3, термометра 4, запального устройства 5.

На желобе выделен контрольный участок определенной длины, на границах которого крепятся быстро сгораемые нити (а, б). Желоб имеет рубашку охлаждения для термостатирования испытуемой жидкости. В желоб 1 заливается исследуемая жидкость, температура которой определяется термометром 4, при необходимости производится ее термостатирование до заданной температуры. Устанавливается экран 3, на контрольном участке натягиваются нити (а, б), включается в сеть электросекундомер 2, включается поджигающее устройство 5.

После воспламенения жидкости убирается экран 3 и фронт пламени, распространяясь по поверхности жидкости, достигает начала контрольного участка. При перегорании нити (а) включается электросекундомер, а при перегорании нити (б) электросекундомер выключается.

По длине контрольного участка (l) и показаниям секундомера (τ) определяется скорость распространения пламени:

$$V = \frac{l}{\tau} \quad (6.2)$$

Для каждого исследуемого образца проводится не менее трех определений скорости и находится их среднее значение.

7. Содержание отчета

Результаты заносятся в таблицу.

Таблица 6.2

№ п/п	Концентрация водного раствора, % масс.	Начальная температура, °С	Время распространения пламени по контрольному участку, с	Скорость распространения пламени, м/с	Средняя скорость, м/с
1	О (расчет)				
2					
3					

По данным таблицы строится зависимость скорости распространения пламени от концентрации горючей жидкости.

По результатам исследования делаются выводы.

8. Контрольные вопросы

1. Какие условия необходимы, чтобы произошло воспламенение жидкости?
2. Что определяет скорость распространения пламени при развитии пожара?
3. Изложите суть механизма распространения пламени по поверхности горючей жидкости.
4. В каком режиме горения пламя распространяется по горючей жидкости?
5. Дайте определение температурных пределов воспламенения, температуры воспламенения и вспышки.
6. Объясните, в какой последовательности необходимо расположить температуры кипения, вспышки, воспламенения, температурные пределы воспламенения, температуру горения, чтобы их значения для одной и той же жидкости возрастали. Ответ иллюстрируйте примером.
7. Как зависит скорость распространения пламени по горючей жидкости от ее температуры в пределах от $T_{\text{нач}}$ до $T_{\text{кип}}$ для открытого резервуара? Приведите графическую зависимость.
8. Как зависит скорость распространения пламени от температуры жидкости в закрытом объеме? Начертите график.
9. Перечислите параметры, от которых зависит скорость распространения пламени по ГЖ.
10. Назовите принцип классификации горючих жидкостей на ЛВЖ и ГЖ.
11. Как изменяется скорость распространения пламени для жидкостей в пределах гомологического ряда?
12. Как и почему изменяется цвет пламени при добавлении к горючей жидкости воды?
13. Как и почему меняется скорость распространения пламени при добавлении к ней воды?
14. Чему должна соответствовать температура поверхности жидкости перед фронтом пламени, чтобы оно могло переместиться на соседний участок?
15. Является ли скорость распространения пламени по ГЖ константой?
16. Чем можно объяснить, что разные ГЖ имеют разные скорости распространения пламени?

17. Существует ли связь между температурными и концентрационными пределами воспламенения, в чем ее суть?

18. Сравнимы ли по численным значениям скорость распространения пламени по газам и горючим жидкостям? Приведите примеры.

19. В чем состоит различие массовой, линейной скоростями выгорания и скоростью распространения пламени по ГЖ?

20. Какие наблюдения и результаты данной лабораторной работы можно использовать на практике?

9. Список литературы, рекомендуемый к использованию по данной теме

Основная литература

1. Кукин, П. П. Теория горения и взрыва : учебное пособие / П. П. Кукин, В. В. Юшин, С. Г. Емельянов ; Юго-Западный гос. ун-т, Рос. гос. технолог. ун-т им. К. Э. Циолковского (МАТИ-РГТУ). – М. : Юрайт, 2015. – 435 с. : ил., табл. – (Бакалавр). – Гриф: Доп. УМО. – Библиогр.: с. 433-435. – ISBN 978-5-9916-2722-1

2. Теория горения и взрывов [Электронный ресурс] : практикум / . — Электрон. текстовые данные. — Новосибирск: Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики, 2015. — 97 с. — 2227-8397. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/55503.html>

Дополнительная литература

1. Девисилов, В. А. Теория горения и взрыва : практикум : учеб. пособие для вузов / В.А. Девисилов, Т.И. Дроздова, С.С. Тимофеева. – Москва : ФОРУМ, 2012. – 351 с. : ил. ; 22. – (Высшее образование). – Гриф: Рек. УМО. – Библиогр.: с. 286-287. – ISBN 978-5-91134-555-6

2. Горев В.А. Теория горения и взрыва [Электронный ресурс] : учебное пособие / В.А. Горев. — Электрон. текстовые данные. — М. : Московский государственный строительный университет, ЭБС АСВ, 2010. — 200 с. — 2227-8397. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/16330.html>

3. Матерова С.И. Химия процессов горения [Электронный ресурс] : учебное пособие / С.И. Матерова. — Электрон. текстовые данные. — Железногорск: Сибирская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, 2017. — 63 с. — 2227-8397. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/66930.html>

Лабораторная работа № 11

Испытания на горючесть для отнесения материалов к негорючим или к горючим

1. Цель работы

Цель работы: провести испытания материалов на горючесть и определить их класс (горючие или не горючие).

2. Формируемые компетенции или их части

Способен определять круг задач в рамках поставленной цели и выбирать оптимальные способы их решения, исходя из действующих правовых норм, имеющихся ресурсов и ограничений (УК-2); способен учитывать современные тенденции развития техники и технологий в области техносферной безопасности, измерительной и вычислительной техники, информационных технологий при решении типовых задач в области профессиональной деятельности, связанной с защитой окружающей среды и

обеспечением безопасности человека (ОПК-1).

3. Теоретическая часть

Строительные материалы в зависимости от значений параметров горючести подразделяются на негорючие (НГ) и горючие (Г).

Строительные материалы относятся к негорючим при следующих значениях параметров горючести:

- приrost температуры в печи не более 50 °С;
- потеря массы образца не более 50 %;
- продолжительность устойчивого пламенного горения не более 10 с.

Строительные материалы, не удовлетворяющие хотя бы одному из указанных значений параметров, относятся к горючим.

4. Оборудование и материалы

Установка для испытаний (рисунок 11.1) состоит из печи, помещенной в теплоизолирующую среду; конусообразного стабилизатора воздушного потока; защитного экрана, обеспечивающего тягу; держателя образца и устройства для введения держателя образца в печь; станины, на которой монтируется печь.

Печь представляет собой трубу из огнеупорного материала (таблица 11.1) плотностью (2800 ± 300) кг/м³, высотой (150 ± 1) мм, внутренним диаметром (75 ± 1) мм, толщиной стенки (10 ± 1) мм. Общая толщина стенки с учетом огнеупорного цементного слоя, фиксирующего электронагревательный элемент, должна составлять не более 15 мм.

Таблица 11.1 – Рекомендуемый состав огнеупорного материала трубчатой печи

Материал	Содержание, %
Глинозем (Al ₂ O ₃)	> 89
или кремнезем и глинозем (SiO ₂ , Al ₂ O ₃)	> 98
Оксид железа (III) Fe ₂ O ₃	< 0,45
Диоксид титана (TiO ₂)	< 0,25
Оксид марганца (MnO)	< 0,1
Следы других оксидов (калия, натрия, кальция и магния)	Остальное

Нагревательный элемент рекомендуется изготавливать из никель-хромовой (80/20) ленты шириной 3 мм и толщиной 0,2 мм. Его располагают на поверхности трубы в соответствии со схемой, приведенной на рисунке 11.2.

Трубчатую печь устанавливают в центре заполненного изолирующим материалом кожуха (наружный диаметр 200 мм, высота 150 мм, толщина стенки 10 мм). Верхняя и нижняя части кожуха ограничены пластинами, имеющими изнутри углубления для фиксации торцов трубчатой печи. Пространство между трубчатой печью и стенками кожуха заполняют порошкообразным оксидом магния плотностью (140 ± 20) кг/м³.

Нижнюю часть трубчатой печи соединяют с конусообразным стабилизатором воздушного потока длиной 500 мм. Внутренний диаметр стабилизатора должен быть (75 ± 1) мм в верхней части, $(10 \pm 0,5)$ мм – в нижней части. Стабилизатор изготавливают из листовой стали толщиной 1 мм. Внутренняя поверхность стабилизатора должна быть отполирована. Шов между стабилизатором и печью следует плотно пригнать до обеспечения герметичности и тщательно обработать для устранения шероховатостей. Верхнюю половину стабилизатора изолируют с наружной стороны слоем минерального волокна толщиной 25 мм [теплопроводность $(0,04 \pm 0,01)$ Вт/(м·К) при 20 °С].

Верхнюю часть печи оборудуют защитным экраном, изготавливаемым из того же материала, что и конус стабилизатора. Высота экрана должна быть 50 мм, внутренний

диаметр (75 ± 1) мм. Внутренняя поверхность экрана и соединительный шов с печью тщательно обрабатывают до получения гладкой поверхности. Наружную часть изолируют слоем минерального волокна толщиной 25 мм [теплопроводность $(0,04 \pm 0,01)$ Вт/(м·К) при 20 °С].

Блок, состоящий из печи, конусообразного стабилизатора и защитного экрана, монтируют на станине, оборудованной основанием и экраном для защиты нижней части конусообразного стабилизатора от направленных воздушных потоков. Высота защитного экрана составляет примерно 550 мм, расстояние от нижней части конусообразного стабилизатора до основания станины – примерно 250 мм.

Для наблюдения за пламенным горением образца над печью на расстоянии 1 м под углом 30° устанавливают зеркало площадью 300 мм².

Установку следует размещать так, чтобы направленные воздушные потоки или интенсивное солнечное, а также другие виды светового излучения не влияли на наблюдение за пламенным горением образца в печи.

Держатель образца (рисунок 11.3) изготавливают из нихромовой или жаропрочной стальной проволоки. Основанием держателя является тонкая сетка из жаропрочной стали. Масса держателя должна составлять (15 ± 2) г. Конструкция держателя образца должна обеспечивать возможность его свободного подвешивания к нижней части трубки из нержавеющей стали наружным диаметром 6 мм с просверленным в ней отверстием диаметром 4 мм.

Устройство для введения держателя образца состоит из металлических стержней, свободно перемещающихся в пределах направляющих, установленных по боковым сторонам кожуха (рисунок 11.1). Устройство для введения держателя образца должно обеспечивать плавное его перемещение по оси трубчатой печи и жесткую фиксацию в геометрическом центре печи.

Для измерения температуры используют термопары никель/хром или никель/алюминий номинальным диаметром 0,3 мм, спай изолированный. Термопары должны иметь защитный кожух из нержавеющей стали диаметром 1,5 мм.

Новые термопары подвергают искусственному старению для снижения отражательной способности.

Печную термопару следует устанавливать так, чтобы ее горячий спай находился на середине высоты трубчатой печи на расстоянии $(10 \pm 0,5)$ мм от ее стенки. Для установки термопары в указанном положении используют направляющий стержень (рисунок 11.4). Фиксированное положение термопары обеспечивается размещением ее в направляющей трубке, прикрепленной к защитному экрану.

Термопару для измерения температуры в образце следует устанавливать так, чтобы ее горячий спай находился в геометрическом центре образца.

Термопару для измерения температуры на поверхности образца следует устанавливать так, чтобы ее горячий спай с самого начала испытания находился на середине высоты образца в плотном контакте с его поверхностью. Термопару следует устанавливать в положении, диаметрально противоположном печной термопаре (рисунок 11.5).

Регистрацию температуры осуществляют в течение всего эксперимента с помощью соответствующих приборов.

Принципиальная электрическая схема установки с измерительными приборами приведена на рисунке 11.6.

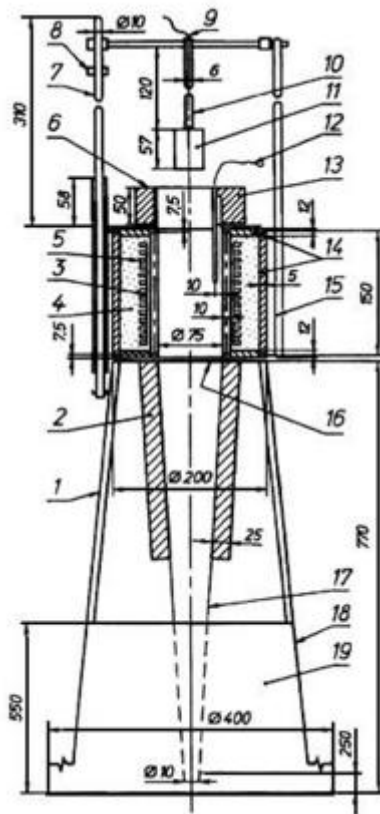


Рисунок 11.1 – Общий вид установки

1 - станина; 2 - изоляция; 3 - огнеупорная труба; 4 - порошок окиси магния; 5 - обмотка; 6 - заслонка; 7 - стальной стержень; 8 - ограничитель; 9 - термопары образца; 10 - нержавеющая стальная трубка; 11 - держатель образца; 12 - печная термопара; 13 - изоляция; 14 - изоляционный материал; 15 - труба из асбестоцемента или аналогичного материала; 16 - уплотнение; 17 - стабилизатор потока воздуха; 18 - листовая сталь; 19 - защитное устройство от сквозняка

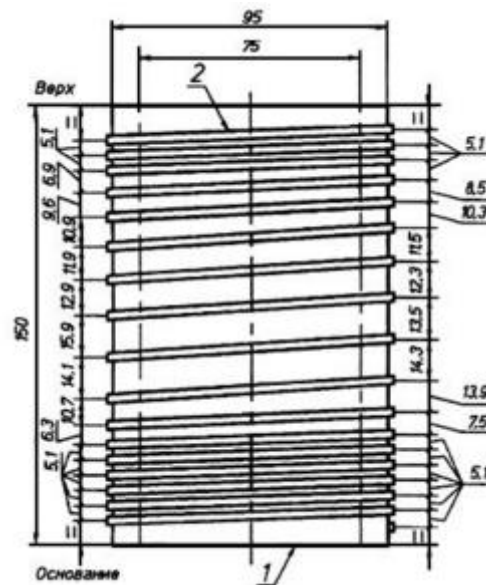


Рисунок 11.2 – Обмотка печи

1 - огнеупорная труба; 2 - нихромовая лента

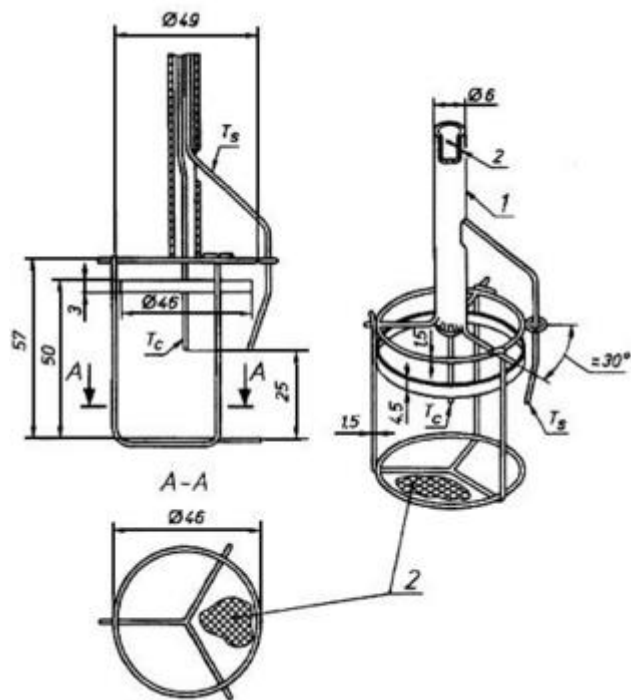


Рисунок 11.3 – Держатель образца

T_c - термопара в центре образца; T_s - термопара на поверхности образца; 1 - трубка из нержавеющей стали; 2 - сетка (размер ячейки 0,9 мм, диаметр проволоки 0,4 мм)

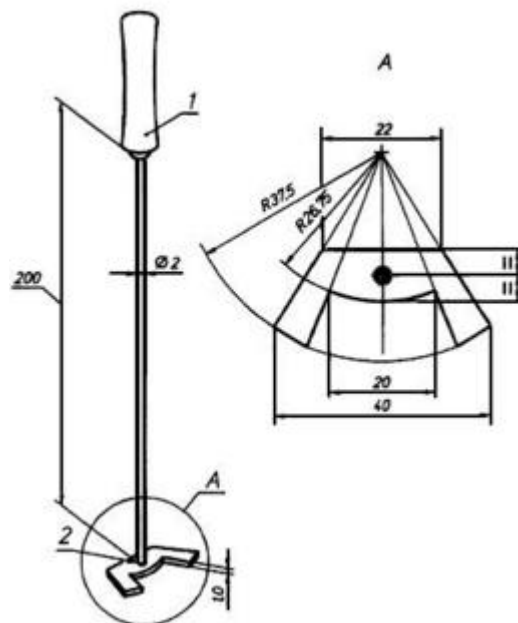


Рисунок 11.4 – Направляющая для установки печной термопары

1 - деревянная ручка; 2 - сварной шов

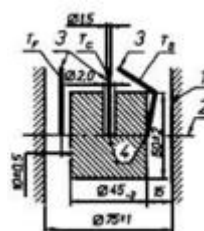


Рисунок 11.5 – Взаимное расположение печи, образца и термопар

T_F - печная термопара; T_c - термопара в центре образца; T_s - термопара на поверхности образца; 1 - стенка печи; 2 - середина высоты постоянной температурной зоны; 3 - термопары в защитном кожухе; 4 - контакт термопар с материалом

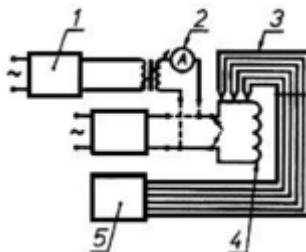


Рисунок 11.6 – Электрическая схема установки

1 - стабилизатор; 2 - амперметр; 3 - термопары; 4 - обмотки печи; 5 - потенциометр

5. Указания по технике безопасности

1. При работе в лаборатории необходимо быть внимательным и соблюдать исключительную осторожность. Недостаточное знакомство с приборами и свойствами веществ, неаккуратность и отступление от правил техники безопасности и порядка проведения работы могут повлечь за собой тяжелые последствия.

Приступать к выполнению лабораторной работы разрешается только после инструктажа и соответствующей записи в журнале.

Слушатель обязан: строго соблюдать порядок выполнения работы, убрать с рабочего места все посторонние предметы, выяснить у преподавателя все возникающие в процессе работы вопросы.

2. Во избежание случайных отравлений запрещается пользоваться для питья лабораторной посудой.

3. Запрещается набирать пипеткой при помощи рта испытуемые жидкости; для этого следует пользоваться резиновой грушей.

4. Категорически запрещается сливать в канализацию огнеопасные жидкости, засорять грязью, твердыми предметами (бумага, древесина, битое стекло) раковины канализации.

5. В лаборатории категорически запрещается:

а) мыть оборудование, пол, столы бензином, керосином и другими легковоспламеняющимися и горючими жидкостями;

б) хранить тряпки, другие предметы, смоченные легковоспламеняющимися жидкостями.

6. Строго воспрещается проводить вблизи огня какие-либо работы, кроме предусмотренных описанием.

7. При пользовании газовыми горелками следует соблюдать следующие правила:

чтобы зажечь горелку надо немного открыть кран, выждать 2-3 с и затем к выходному отверстию поднести пламя спички или электрозажигалки. Если от неправильного зажигания горелки пламя «проскакивает», т.е. горит внутри горелки, ее следует немедленно погасить, дать ей остыть и только после этого зажечь снова.

8. Действующие электронагревательные приборы нельзя оставлять без присмотра.

9. Все работы с легковоспламеняющимися и горючими жидкостями должны проводиться в вытяжном шкафу или под вытяжным зонтом при работающей вентиляции.

10. Категорически запрещается нагревать на открытом огне сосуды, содержащие низкокипящие огнеопасные жидкости.

11. При нагревании ЛВЖ в количестве более 0,5 л необходимо под прибор ставить

кювету достаточной емкости для предотвращения разлива жидкости в случае аварии.

12. В случае внезапного прекращения подачи воды на охлаждение приборов с ЛВЖ и ГЖ горелки должны быть потушены, а электрический ток выключен.

13. После окончания работы необходимо проверить:

- а) закрыты ли газовые и водяные краны;
- б) потушены ли горелки и другие огневые приборы, выключены ли электронагревательные приборы;
- в) закрыты ли пробками бутылки и банки с реактивами и другими жидкостями и материалами.

14. Необходимо ознакомиться с местом нахождения в лаборатории огнетушителя, ящика с песком, асбестополотна и др.

15. В качестве первоочередной помощи при тепловом ожоге обожженное место необходимо смочить раствором перманганата калия, затем смазать мазью от ожогов, вазелином или раствором пищевой соды (бикарбонатом натрия) и перевязать бинтом.

6. Задания

1. Экспериментальная часть.

Удалить держатель образца из печи. Печная термопара должна быть установлена в соответствии с требованиями к ней.

Подключить нагревательный элемент печи к источнику питания в соответствии со схемой, приведенной на рисунке 11.6. При испытаниях автоматический контроль температуры в печи осуществлять не следует.

Примечание - Новую трубчатую печь следует прогревать постепенно. Рекомендуется ступенчатый режим с шагом 200 °С и выдержкой в течение 2 ч при каждой температуре.

Установить стабильный температурный режим в печи. Стабилизацию считают достигнутой при условии обеспечения средней температуры в печи в диапазоне 745-755 °С по меньшей мере в течение 10 мин. При этом допускаемое отклонение от границ указанного диапазона должно составлять не более 2 °С за 10 мин.

После стабилизации печи следует измерить температуру стенки печи. Замеры проводят по трем равноудаленным вертикальным осям. По каждой оси температуру измеряют в трех точках: на середине высоты трубчатой печи, на расстоянии 30 мм вверх и 30 мм вниз по оси. Для удобства измерений можно использовать сканирующее устройство с термопарами и изолирующими трубками (рисунок 11.7). При измерении следует обеспечивать плотный контакт термопары со стенкой печи. Показания термопары в каждой точке следует регистрировать только после достижения стабильных показаний в течение 5 мин.

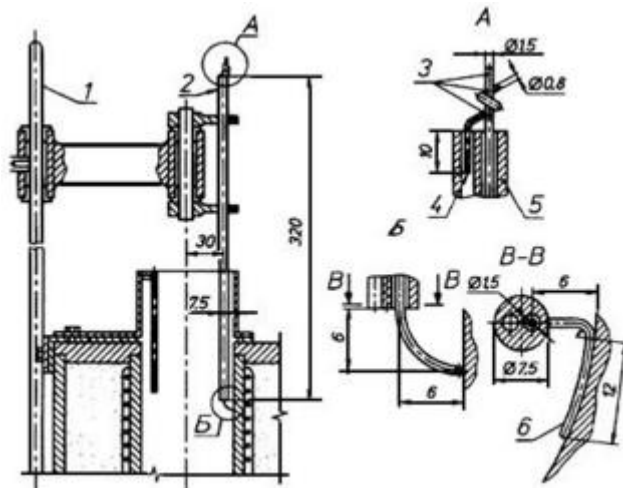


Рисунок 11.7 – Сканирующее устройство термопары

1 - огнестойкий стальной стержень; 2 - термопара в защитном кожухе из глиноземистого фарфора; 3 - серебряный припой; 4 - стальная проволока; 5 - керамическая трубка; 6 - горячий слой

Средняя температура стенки печи, рассчитанная как среднее арифметическое по показаниям термопар во всех точках должна быть $(835 \pm 10)^\circ\text{C}$. Температуру стенки печи следует поддерживать в указанных пределах до начала испытания.

При неправильной установке печной трубы (вверх дном) необходимо проверить соответствие ее ориентации, приведенной на рисунке 11.2. Для этого следует с помощью термопарного сканирующего устройства измерить температуру стенки печи по одной оси через каждые 10 мм. Полученный температурный профиль при правильной установке соответствует изображенному сплошной линией, при неправильной - пунктирной линией (рисунок 11.8).

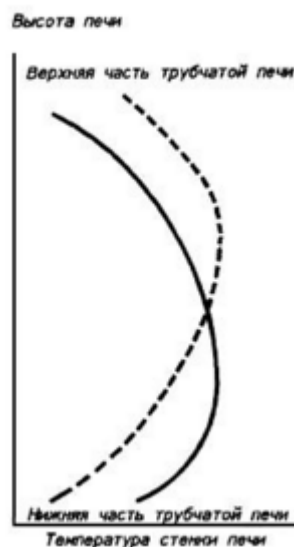


Рисунок 11.8 – Температурные профили стенки печи

2. Проведение испытания

2.1. Удалить из печи держатель образца, проверить установку печной термопары, включить источник питания.

2.2. Стабилизировать печь.

2.3. Поместить образец в держатель, установить термопары в центре и на поверхности образца.

2.4. Ввести держатель образца в печь и установить его. Продолжительность операции должна быть не более 5 с.

2.5. Включить секундомер сразу же после введения образца в печь. В течение испытания вести регистрацию показаний термопар в печи, в центре и на поверхности образца.

2.6. Продолжительность испытания составляет, как правило, 30 мин. Испытание прекращают через 30 мин при условии достижения температурного баланса к этому времени. Температурный баланс считают достигнутым, если показания каждой из трех термопар изменяются не более чем на 2°C за 10 мин. При этом фиксируют конечные термопары в печи, в центре и на поверхности образца.

Если по истечении 30 мин температурный баланс не достигается хотя бы для одной из трех термопар, испытание продолжают, проверяя наличие температурного баланса с интервалом 5 мин.

2.7. При достижении температурного баланса для всех трех термпар испытание прекращают и фиксируют его продолжительность.

2.8. Держатель образца извлекают из печи, образец охлаждают в эксикаторе и взвешивают.

Осыпавшиеся с образца во время или после испытания остатки (продукты карбонизации, зола и т.п.) собирают, взвешивают и включают в массу образца после испытания.

2.9. При испытании фиксируют все наблюдения, касающиеся поведения образца, и регистрируют следующие показатели:

- массу образца до испытания m_u , г;
- массу образца после испытания m_k , г;
- начальную температуру печи $T_{п.н.}$, °С;
- максимальную температуру печи $T_{п.м.}$, °С;
- конечную температуру печи $T_{п.к.}$, °С;
- максимальную температуру в центре образца $T_{ц.м.}$, °С;
- конечную температуру в центре образца $T_{ц.к.}$, °С;
- максимальную температуру поверхности образца $T_{п.о.м.}$, °С;
- конечную температуру поверхности образца $T_{п.о.к.}$, °С;
- продолжительность устойчивого пламенного горения образца t_r , с.

7. Содержание отчета

3. Обработка результатов.

3.1. Рассчитывают для каждого образца прирост температуры в печи, в центре и на поверхности образца:

а) прирост температуры в печи

$$T_{пп} = T_{п.м} - T_{п.к}; \quad (17.1)$$

б) прирост температуры в центре образца

$$T_{цо} = T_{ц.м} - T_{ц.к}; \quad (17.2)$$

в) прирост температуры на поверхности образца.

$$T_{по} = T_{п.о.м} - T_{п.о.к}. \quad (17.3)$$

3.2. Рассчитывают среднюю арифметическую величину (по пяти образцам) прироста температуры в печи, в центре и на поверхности образца.

3.3. Рассчитывают среднюю арифметическую величину (по пяти образцам) продолжительности устойчивого пламенного горения.

3.4. Рассчитывают потерю массы для каждого образца (в процентах от начальной массы образца) и определяют среднюю арифметическую величину для пяти образцов.

По результатам исследования делаются выводы.

8. Контрольные вопросы

1. Какими показателями определяется пожарная опасность строительных материалов?

2. Перечислите группы горючих и негорючих строительных материалов.

3. Назовите группы горючих строительных материалов по распространению пламени по поверхности.

4. Назовите группы горючих строительных материалов по дымообразующей способности.

5. Назовите группы горючих строительных материалов по токсичности продуктов горения.

СНиП 21-01-97* Пожарная безопасность зданий и сооружений.

9. Список литературы, рекомендуемый к использованию по данной теме

Основная литература

1. Кукин, П. П. Теория горения и взрыва : учебное пособие / П. П. Кукин, В. В. Юшин, С. Г. Емельянов ; Юго-Западный гос. ун-т, Рос. гос. технолог. ун-т им. К. Э. Циолковского (МАТИ-РГТУ). – М. : Юрайт, 2015. – 435 с. : ил., табл. – (Бакалавр). – Гриф: Доп. УМО. – Библиогр.: с. 433-435. – ISBN 978-5-9916-2722-1

2. Теория горения и взрывов [Электронный ресурс] : практикум / . — Электрон. текстовые данные. — Новосибирск: Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики, 2015. — 97 с. — 2227-8397. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/55503.html>

Дополнительная литература

1. Девисилов, В. А. Теория горения и взрыва : практикум : учеб. пособие для вузов / В.А. Девисилов, Т.И. Дроздова, С.С. Тимофеева. – Москва : ФОРУМ, 2012. – 351 с. : ил. ; 22. – (Высшее образование). – Гриф: Рек. УМО. – Библиогр.: с. 286-287. – ISBN 978-5-91134-555-6

2. Горев В.А. Теория горения и взрыва [Электронный ресурс] : учебное пособие / В.А. Горев. — Электрон. текстовые данные. — М. : Московский государственный строительный университет, ЭБС АСВ, 2010. — 200 с. — 2227-8397. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/16330.html>

3. Матерова С.И. Химия процессов горения [Электронный ресурс] : учебное пособие / С.И. Матерова. — Электрон. текстовые данные. — Железногорск: Сибирская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, 2017. — 63 с. — 2227-8397. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/66930.html>

Лабораторная работа № 12

Испытания горючих материалов для определения их групп горючести

1. Цель работы

Цель работы: провести испытания материалов по определению их групп горючести.

2. Формируемые компетенции или их части

Способен определять круг задач в рамках поставленной цели и выбирать оптимальные способы их решения, исходя из действующих правовых норм, имеющихся ресурсов и ограничений (УК-2); способен учитывать современные тенденции развития техники и технологий в области техносферной безопасности, измерительной и вычислительной техники, информационных технологий при решении типовых задач в области профессиональной деятельности, связанной с защитой окружающей среды и обеспечением безопасности человека (ОПК-1).

3. Теоретическая часть

Горючие строительные материалы в зависимости от значений параметров горючести, определяемых по методу II, подразделяют на четыре группы горючести: Г1, Г2, Г3, Г4 в соответствии с таблицей 18.1. Материалы следует относить к определенной группе горючести при условии соответствия всех значений параметров, установленных таблицей 12.1 для этой группы.

Таблица 12.1 – Группы горючести

Группа	Параметры горючести
--------	---------------------

горючести материалов	Температура дымовых газов T , °C	Степень повреждения по длине S_L , %	Степень повреждения по массе S_m , %	Продолжительность самостоятельного горения t_{cr} , с
Г1	≤ 135			0
Г2	≤ 235			
Г3	≤ 450			≤ 300
Г4	> 450			> 300
Примечание – Для материалов групп горючести Г1-Г3 не допускается образование горящих капель расплава при испытании.				

4. Оборудование и материалы

Для каждого испытания изготавливают 12 образцов длиной 1000 мм, шириной 190 мм. Толщина образцов должна соответствовать толщине материала, применяемого в реальных условиях. Если толщина материала составляет более 70 мм, толщина образцов должна быть 70 мм.

При изготовлении образцов экспонируемая поверхность не должна подвергаться обработке.

Образцы для стандартного испытания материалов, применяемых только в качестве отделочных и облицовочных, а также для испытания лакокрасочных покрытий, изготавливают в сочетании с негорючей основой. Способ крепления должен обеспечивать плотный контакт поверхностей материала и основы.

В качестве негорючей основы следует использовать асбестоцементные листы толщиной 10 или 12 мм по ГОСТ 18124.

В тех случаях, когда в конкретной технической документации не обеспечиваются условия для стандартного испытания, образцы должны изготавливаться с основой и креплением, указанными в технической документации.

Толщина лакокрасочных покрытий должна соответствовать принятой в технической документации, но иметь не менее четырех слоев.

В этом случае испытания должны быть проведены отдельно для материала и отдельно с применением его в качестве отделки и облицовок с определением групп горючести для всех случаев.

Для несимметричных слоистых материалов с различными поверхностями изготавливают два комплекта образцов с целью экспонирования обеих поверхностей. При этом группу горючести материала устанавливают по худшему результату.

Установка для испытания состоит из камеры сжигания, системы подачи воздуха в камеру сжигания, газоотводной трубы, вентиляционной системы для удаления продуктов сгорания (рисунок 12.1).

Конструкция стенок камеры сжигания должна обеспечивать стабильность температурного режима испытаний, установленного настоящим стандартом. С этой целью рекомендуется использовать следующие материалы:

- для внутренней и наружной поверхности стенок - листовую сталь толщиной 1,5 мм;
- для теплоизоляционного слоя - минераловатные плиты [плотность 100 кг/м³, теплопроводность 0,1 Вт/(м·К), толщина 40 мм].

В камере сжигания устанавливают держатель образцов, источник зажигания, диафрагму. Переднюю стенку камеры сжигания оборудуют дверцей с остекленными проемами. В центре боковой стенки камеры следует предусмотреть отверстие с заглушкой для введения термопар.

Держатель образца состоит из четырех прямоугольных рам, расположенных по периметру источника зажигания (рисунок 12.1), и должен обеспечивать показанное на рисунке 12.2 положение образца относительно источника зажигания, стабильность положения каждого из четырех образцов до конца испытания. Держатель образца следует устанавливать на опорной раме, обеспечивающей его свободное перемещение в горизонтальной плоскости. Держатель образца и детали крепления не должны перекрывать боковые стороны экспонируемой поверхности более чем на 5 мм.

Источником зажигания является газовая горелка, состоящая из четырех отдельных сегментов. Смешивание газа с воздухом осуществляется с помощью отверстий, расположенных на газоподводящих трубах при входе в сегмент. Расположение сегментов горелки относительно образца и ее принципиальная схема показаны на рисунке 12.2.

Система подачи воздуха состоит из вентилятора, ротаметра и диафрагмы и должна обеспечивать поступление в нижнюю часть камеры сжигания равномерно распределенного по ее сечению потока воздуха в количестве $(10 \pm 1,0)$ м³/мин температурой не менее (20 ± 2) °С.

Диафрагму изготавливают из перфорированного стального листа толщиной 1,5 мм с отверстиями диаметрами $(20 \pm 0,2)$ мм и $(25 \pm 0,2)$ мм и расположенной над ним на расстоянии (10 ± 2) мм металлической сетки из проволоки диаметром не более 1,2 мм с размером ячеек не более 1,5х1,5 мм. Расстояние между диафрагмой и верхней плоскостью горелки должно составлять не менее 250 мм.

Газоотводную трубу поперечным сечением $(0,25 \pm 0,025)$ м² и длиной не менее 750 мм располагают в верхней части камеры сжигания. В газоотводной трубе устанавливают четыре термопары для измерения температуры отходящих газов (рисунок 12.1).

Вентиляционная система для удаления продуктов сгорания состоит из зонта, устанавливаемого над газоотводной трубой, воздуховода и вентиляционного насоса.

Для измерения температуры при испытании используют термопары диаметром не более 1,5 мм и соответствующие регистрирующие приборы.

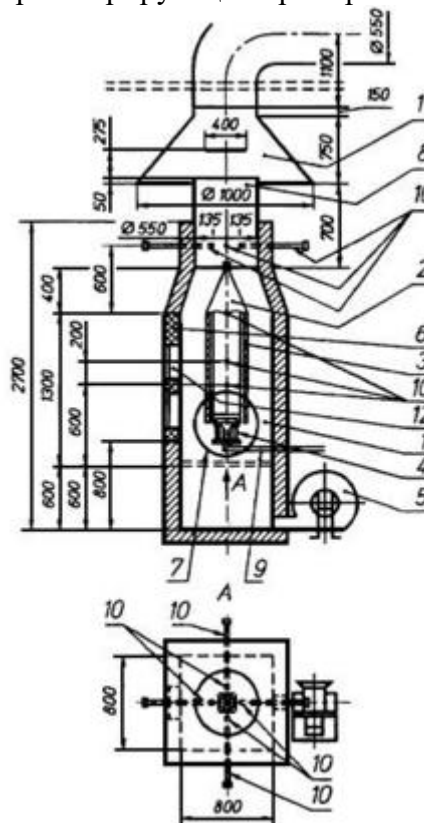


Рисунок 12.1 – Общий вид установки

1 - камера сжигания; 2 - держатель образца; 3 - образец; 4 - газовая горелка;
 5 - вентилятор подачи воздуха; 6 - дверца камеры сжигания; 7 - диафрагма;
 8 - вентиляционная труба; 9 - газопровод; 10 - термопары; 11 - вытяжной зонт;
 12 - смотровое окно

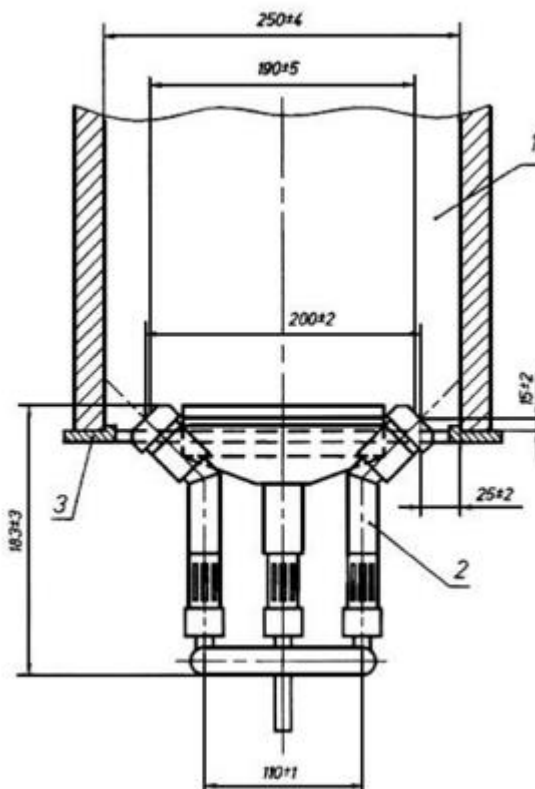


Рисунок 12.2 – Газовая горелка

1 - образец; 2 - газовая горелка; 3 - основание держателя (опора для образца)

5. Указания по технике безопасности

1. При работе в лаборатории необходимо быть внимательным и соблюдать исключительную осторожность. Недостаточное знакомство с приборами и свойствами веществ, неаккуратность и отступление от правил техники безопасности и порядка проведения работы могут повлечь за собой тяжелые последствия.

Приступать к выполнению лабораторной работы разрешается только после инструктажа и соответствующей записи в журнале.

Слушатель обязан: строго соблюдать порядок выполнения работы, убрать с рабочего места все посторонние предметы, выяснить у преподавателя все возникающие в процессе работы вопросы.

2. Во избежание случайных отравлений запрещается пользоваться для питья лабораторной посудой.

3. Запрещается набирать пипеткой при помощи рта испытуемые жидкости; для этого следует пользоваться резиновой грушей.

4. Категорически запрещается сливать в канализацию огнеопасные жидкости, засорять грязью, твердыми предметами (бумага, древесина, битое стекло) раковины канализации.

5. В лаборатории категорически запрещается:

а) мыть оборудование, пол, столы бензином, керосином и другими легковоспламеняющимися и горючими жидкостями;

б) хранить тряпки, другие предметы, смоченные легковоспламеняющимися жидкостями.

6. Строго воспрещается проводить вблизи огня какие-либо работы, кроме предусмотренных описанием.

7. При пользовании газовыми горелками следует соблюдать следующие правила:

чтобы зажечь горелку надо немного открыть кран, выждать 2-3 с и затем к выходному отверстию поднести пламя спички или электрозажигалки. Если от неправильного зажигания горелки пламя «проскакивает», т.е. горит внутри горелки, ее следует немедленно погасить, дать ей остыть и только после этого зажечь снова.

8. Действующие электронагревательные приборы нельзя оставлять без присмотра.

9. Все работы с легковоспламеняющимися и горючими жидкостями должны проводиться в вытяжном шкафу или под вытяжным зонтом при работающей вентиляции.

10. Категорически запрещается нагревать на открытом огне сосуды, содержащие низкокипящие огнеопасные жидкости.

11. При нагревании ЛВЖ в количестве более 0,5 л необходимо под прибор ставить кювету достаточной емкости для предотвращения разлива жидкости в случае аварии.

12. В случае внезапного прекращения подачи воды на охлаждение приборов с ЛВЖ и ГЖ горелки должны быть потушены, а электрический ток выключен.

13. После окончания работы необходимо проверить:

а) закрыты ли газовые и водяные краны;

б) потушены ли горелки и другие огневые приборы, выключены ли электронагревательные приборы;

в) закрыты ли пробками бутылки и банки с реактивами и другими жидкостями и материалами.

14. Необходимо ознакомиться с местом нахождения в лаборатории огнетушителя, ящика с песком, асбестополотна и др.

15. В качестве первоочередной помощи при тепловом ожоге обожженное место необходимо смочить раствором перманганата калия, затем смазать мазью от ожогов, вазелином или раствором пищевой соды (бикарбонатом натрия) и перевязать бинтом.

6. Задания

1. Экспериментальная часть.

1.1. Подготовка установки к испытаниям.

1.1.1. Подготовка к испытанию состоит в проведении калибровки с целью установления расхода газа (л/мин), обеспечивающего в камере сжигания устанавливаемый настоящим стандартом температурный режим испытания (таблица 12.3).

Таблица 12.3 – Режим испытания

Расстояние от нижней кромки калибровочного образца, мм	Температура, °С	
	максимальная	минимальная
300	350	220
500	220	150
1000	140	100
1600	105	90

1.1.2. Калибровка установки проводится на четырех образцах из стали размерами 1000x190x1,5 мм.

Примечание - Для придания жесткости калибровочные образцы из листовой стали рекомендуется изготавливать с отбортовкой.

1.1.3 Контроль температурного режима при калибровке осуществляют по показаниям термопар (10 шт.), устанавливаемых на калибровочных образцах (6 шт.), и термопар (4 шт.), установленных постоянно в газоотводной трубе.

1.1.4. Термопары устанавливают по центральной оси любых двух противоположных калибровочных образцов на уровнях, указанных в таблице 12.3. Горячий спай термопар должен находиться на расстоянии 10 мм от экспонируемой поверхности образца. Термопары не должны соприкасаться с калибровочным образцом. С целью изоляции термопар рекомендуется использовать керамические трубки.

1.1.5. Калибровку шахтной печи проводят через каждые 30 испытаний и при измерении состава газа, подаваемого в источник зажигания.

1.1.6. Последовательность операций при калибровке:

- установить калибровочный образец в держатель;
- установить термопары на калибровочных образцах;
- ввести держатель с образцом в камеру сжигания, включить измерительные приборы, подачу воздуха, вытяжную вентиляцию, источник зажигания, закрыть дверцу, зафиксировать показания термопар через 10 мин после включения источника зажигания.

При несоответствии температурного режима в камере сжигания требованиям таблицы 12.3 повторить калибровку при других расходах газа.

При несоответствии температурного режима в камере сжигания требованиям таблицы 12.3 повторить калибровку при других расходах газа.

Установленный при калибровке расход газа следует использовать при испытании до проведения следующей калибровки.

2. Проведение испытания

2.1. Для каждого материала следует проводить три испытания. Каждое из трех испытаний заключается в одновременном испытании четырех образцов материала.

2.2. Проверить систему измерения температуры дымовых газов, для чего включить измерительные приборы и подачу воздуха. Указанная операция осуществляется при закрытой дверце камеры сжигания и неработающем источнике зажигания. Отклонение показаний каждой из четырех термопар от их среднего арифметического значения должно составлять не более 5 °С.

2.3. Взвесить четыре образца, поместить в держатель, ввести его в камеру сжигания.

2.4. Включить измерительные приборы, подачу воздуха, вытяжную вентиляцию, источник зажигания, закрыть дверцу камеры.

2.5. Продолжительность воздействия на образец пламени от источника зажигания должна составлять 10 мин. По истечении 10 мин источник зажигания выключают. При наличии пламени или признаков тления фиксируют продолжительность самостоятельного горения (тления). Испытание считают законченным после остывания образцов до температуры окружающей среды.

2.6. После окончания испытания выключить подачу воздуха, вытяжную вентиляцию, измерительные приборы, извлечь образцы из камеры сжигания.

2.7. Для каждого испытания определяют следующие показатели:

- температуру дымовых газов;
- продолжительность самостоятельного горения и (или) тления;
- длину повреждения образца;
- массу образца до и после испытания.

2.8. В процессе проведения испытания регистрируют температуру дымовых газов не менее двух раз в минуту по показаниям всех четырех термопар, установленных в газоотводной трубе, и фиксируют продолжительность самостоятельного горения образцов (при наличии пламени или признаков тления).

- 2.9. При испытании фиксируют также следующие наблюдения:
- время достижения максимальной температуры дымовых газов;
 - переброс пламени на торцы и необогреваемую поверхность образцов;
 - сквозное прогорание образцов;
 - образование горящего расплава;
 - внешний вид образцов после испытания: осаждение сажи, изменение цвета, оплавление, спекание, усадка, вспучивание, коробление, образование трещин и т.п.;
 - время до распространения пламени по всей длине образца;
 - продолжительность горения по всей длине образца.

7. Содержание отчета

3. Обработка результатов.

3.1. После окончания испытания измеряют длину отрезков неповрежденной части образцов (по рисунку 12.3) и определяют остаточную массу m_k образцов.

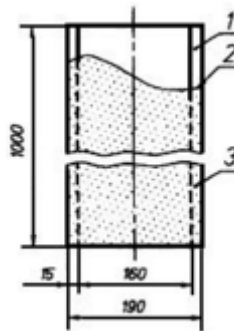


Рисунок 12.3 – Определение длины повреждения образца

1 - неповрежденная поверхность; 2 - граница повреждений и неповрежденной поверхности; 3 - поврежденная поверхность

3.2. Неповрежденной считают ту часть образца, которая не сгорела и не обуглилась ни на поверхности, ни внутри. Осаждение сажи, изменение цвета образца, местные сколы, спекание, оплавление, вспучивание, усадка, коробление, изменение шероховатости поверхности не считают повреждениями.

3.3. Результат измерения округляют до 1 см.

3.4. Неповрежденную часть образцов, оставшуюся на держателе, взвешивают. Точность взвешивания должна составлять не менее 1% от начальной массы образца.

3.5. *Обработка результатов одного испытания (четырёх образцов)*

3.5.1. Температуру дымовых газов принимают равной среднему арифметическому значению одновременно регистрируемых максимальных температурных показаний всех четырех термопар, установленных в газоотводной трубе.

3.5.2. Длина повреждения одного образца определяется разностью между номинальной длиной до испытания и средней арифметической длиной неповрежденной части образца, определяемой из длин ее отрезков, измеряемых в соответствии с рисунком 18.3.

Измеренные значения длин отрезков следует округлять до 1 см.

3.5.3. Длина повреждения образцов при испытании определяется как средняя арифметическая величина из длин повреждения каждого из четырех испытанных образцов.

3.5.4. Повреждение по массе каждого образца определяется разностью между массой образца до испытания и его остаточной массой после испытания.

3.5.5. Повреждение по массе образцов определяется средней арифметической величиной этого повреждения для четырех испытанных образцов.

3.6. *Обработка результатов трех испытаний (определение параметров горючести)*

3.6.1. При обработке результатов трех испытаний рассчитывают следующие параметры горючести строительного материала:

- температуру дымовых газов;
- продолжительность самостоятельного горения;
- степень повреждения по длине;
- степень повреждения по массе.

3.6.2. Температуру дымовых газов (T , °C) и продолжительность самостоятельного горения (t_{cr} , с) определяют как среднее арифметическое значение результатов трех испытаний.

3.6.3. Степень повреждения по длине (S_L , %) определяют процентным отношением длины повреждения образцов к их номинальной длине и рассчитывают как среднее арифметическое значение этого отношения из результатов каждого испытания.

3.6.4 Степень повреждения по массе (S_m , %) определяется процентным отношением массы поврежденной части образцов к начальной (по результатам одного испытания) и рассчитывается как среднее арифметическое значение этого отношения из результатов каждого испытания.

3.6.5 Полученные результаты округляют до целых чисел.

3.6.6. Материал следует относить к группе горючести.

По результатам исследования делаются выводы.

8. Контрольные вопросы

1. Приведите классификацию групп горючести.

СНиП 21-01-97* Пожарная безопасность зданий и сооружений.

9. Список литературы, рекомендуемый к использованию по данной теме

Основная литература

1. Кукин, П. П. Теория горения и взрыва : учебное пособие / П. П. Кукин, В. В. Юшин, С. Г. Емельянов ; Юго-Западный гос. ун-т, Рос. гос. технолог. ун-т им. К. Э. Циолковского (МАТИ-РГТУ). – М. : Юрайт, 2015. – 435 с. : ил., табл. – (Бакалавр). – Гриф: Доп. УМО. – Библиогр.: с. 433-435. – ISBN 978-5-9916-2722-1

2. Теория горения и взрывов [Электронный ресурс] : практикум / . — Электрон. текстовые данные. — Новосибирск: Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики, 2015. — 97 с. — 2227-8397. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/55503.html>

Дополнительная литература

1. Девисилов, В. А. Теория горения и взрыва : практикум : учеб. пособие для вузов / В.А. Девисилов, Т.И. Дроздова, С.С. Тимофеева. – Москва : ФОРУМ, 2012. – 351 с. : ил. ; 22. – (Высшее образование). – Гриф: Рек. УМО. – Библиогр.: с. 286-287. – ISBN 978-5-91134-555-6

2. Горев В.А. Теория горения и взрыва [Электронный ресурс] : учебное пособие / В.А. Горев. — Электрон. текстовые данные. — М. : Московский государственный строительный университет, ЭБС АСВ, 2010. — 200 с. — 2227-8397. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/16330.html>

3. Матерова С.И. Химия процессов горения [Электронный ресурс] : учебное пособие / С.И. Матерова. — Электрон. текстовые данные. — Железногорск: Сибирская

пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, 2017. — 63 с. — 2227-8397. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/66930.html>

Лабораторная работа № 13 **Испытания материалов на воспламеняемость**

1. Цель работы

Цель работы: провести испытания материалов на воспламеняемость.

2. Формируемые компетенции или их части

Способен определять круг задач в рамках поставленной цели и выбирать оптимальные способы их решения, исходя из действующих правовых норм, имеющихся ресурсов и ограничений (УК-2); способен учитывать современные тенденции развития техники и технологий в области техносферной безопасности, измерительной и вычислительной техники, информационных технологий при решении типовых задач в области профессиональной деятельности, связанной с защитой окружающей среды и обеспечением безопасности человека (ОПК-1).

3. Теоретическая часть

Воспламеняемость - способность веществ и материалов к воспламенению.

Воспламенение - начало пламенного горения под действием источника зажигания, при настоящем стандартном испытании характеризуется устойчивым пламенным горением.

Время воспламенения - время от начала испытания до возникновения устойчивого пламенного горения.

Устойчивое пламенное горение - горение, продолжающееся до очередного воздействия на образец пламени от источника зажигания.

Поверхностная плотность теплового потока (ППТП) - лучистый тепловой поток, воздействующий на единицу поверхности образца.

Критическая поверхностная плотность теплового потока (КППТП) - минимальное значение поверхностной плотности теплового потока, при котором возникает устойчивое пламенное горение.

Экспонируемая поверхность - поверхность образца, подвергающаяся воздействию лучистого теплового потока и пламени от источника зажигания при испытании на воспламеняемость.

Сущность метода испытания материалов на воспламеняемость состоит в определении параметров воспламеняемости материала при заданных стандартом уровнях воздействия на поверхность образца лучистого теплового потока и пламени от источника зажигания.

Параметрами воспламеняемости материала являются КППТП и время воспламенения.

Для классификации материалов по группам воспламеняемости используют КППТП.

Плотность лучистого теплового потока должна находиться в пределах от 10 до 50 .

Начальная плотность лучистого теплового потока при испытаниях (ППТП) равна 30 кВт/м².

Классификация строительных материалов по группам воспламеняемости

Горючие строительные материалы (по ГОСТ 30244) в зависимости от величины КППТП подразделяют на три группы воспламеняемости: В1, В2, В3 (таблица 13.1).

Таблица 13.1 – Группы воспламеняемости

Группа воспламеняемости материалов	КППТП, кВт/м ²
В1	35 и более
В2	от 20 до 35
В3	менее 20

4. Оборудование и материалы

Для испытаний изготавливают 15 образцов, имеющих форму квадрата, со стороной 165 мм и отклонением минус 5 мм. Толщина образцов должна составлять не более 70 мм. При каждой величине ППТП испытания проводят на трех образцах.

При изготовлении образцов экспонируемая поверхность не должна подвергаться обработке.

При наличии на экспонируемой поверхности гофров, рельефа, тиснения и т.п. размер выступов (впадин) должен составлять не более 5 мм.

При несоответствии экспонируемой поверхности указанным требованиям допускается для проведения испытаний изготавливать образцы из материала с плоской поверхностью, т.е. без гофров, рельефа, тиснения и т.п.

Образцы для стандартного испытания материалов, применяемых только в качестве отделочных и облицовочных, а также для испытания лакокрасочных покрытий и кровельных материалов изготавливают в сочетании с негорючей основой. Способ крепления должен обеспечивать плотный контакт поверхностей материала и основы.

В качестве негорючей основы следует использовать асбестоцементные листы по ГОСТ 18124 толщиной 10 или 12 мм.

В тех случаях, когда в конкретной технической документации не обеспечиваются условия для стандартного испытания, образцы изготавливают с основой и креплением, указанными в технической документации.

Лакокрасочные покрытия, а также кровельные мастики следует наносить на основу не менее чем в четыре слоя, при этом расход материала при нанесении на основу каждого слоя должен соответствовать принятому в технической документации.

В этом случае испытания проводят отдельно для материала и отдельно с применением его в качестве отделки и облицовок.

Перед испытанием образцы кондиционируют до достижения постоянной массы при температуре $23 \pm 2^\circ\text{C}$ и относительной влажности $50 \pm 5\%$. Постоянство массы считают достигнутым, если при двух последовательных взвешиваниях с интервалом в 24 ч отличие в массе образцов составляет не более 0,1% от исходной массы образца.

Общий вид установки для испытаний на воспламеняемость приведен на рисунке 13.1.

Установка состоит из следующих основных частей:

- опорная станина;
- подвижная платформа;
- источник лучистого теплового потока (радиационная панель);
- система зажигания (вспомогательная стационарная горелка, подвижная горелка с механизированной и ручной системой перемещения).

В состав вспомогательного оборудования входят: держатель образца, экранирующая пластина, держатель с образцом-имитатором, система регулирования

расхода газовой смеси, регулирующий и регистрирующие приборы, измеритель теплового потока, регистратор времени.

Установка должна быть оборудована защитным экраном и вытяжным зонтом.

Все размеры, приведенные в следующем описании установки, а также на рисунках, являются номинальными, за исключением указанных с допусками.

Опорная станина

Конструкция опорной станины, основные узлы и детали системы перемещения подвижной платформы представлены на рисунках 13.2 и 13.3.

Основание опорной станины изготавливают в виде прямоугольной рамы размером 275x230 мм из профиля квадратного сечения 25x25 мм с толщиной стенки 1,5 мм.

По углам рамы монтируют четыре вертикальные опоры диаметром 16 мм для крепления защитной плиты. Расстояние от рамы до защитной плиты составляет 260 мм.

Защитная плита имеет форму квадрата со стороной 220 мм, толщина плиты 4 мм. В центре защитной плиты вырезают отверстие диаметром 150 мм. По краю отверстия с верхней стороны плиты срезают фаску под углом 45° размером 4 мм.

Подвижная платформа для образца имеет форму квадрата со стороной 180 мм, толщина платформы 4 мм. В центре нижней стороны платформы устанавливают вертикальный стержень с бобышкой на нижнем конце стержня. Диаметр стержня - 12 мм, длина - 148 мм.

Система перемещения подвижной платформы состоит из двух вертикальных направляющих (стержни длиной не менее 355 мм и диаметром 20 мм), горизонтальной подвижной планки (сечение 25x25 мм) с двумя втулками на концах планки и отверстием в центре для вертикального стержня подвижной платформы, а также рычага с противовесом.

Вертикальные направляющие монтируют по центру коротких сторон рамы (основание опорной станины).

Горизонтальную подвижную планку устанавливают на вертикальных направляющих. Втулки должны обеспечивать свободное перемещение планки по направляющим. Положение планки фиксируется вручную, с помощью винтов.

Под горизонтальной планкой устанавливают рычаг с противовесом. Рычаг должен заканчиваться роликом, упирающимся в бобышку вертикального стержня подвижной платформы.

Рычаг с противовесом должен обеспечивать перемещение платформы с образцом к защитной плите до достижения плотного контакта поверхности образца и защитной плиты. Указанным требованиям удовлетворяет рычаг длиной примерно 320 мм с противовесом массой примерно 3 кг.

При плавлении, размягчении или усадке образца допускается смещение платформы относительно защитной плиты на расстояние не более 5 мм. Для выполнения этого требования устанавливают регулируемый стопор или используют прокладки из негорючего материала, размещаемые между платформой и защитной плитой.

Радиационная панель

Радиационная панель (рисунки 13.4, 13.5) должна обеспечивать заданные стандартом уровни воздействия лучистого теплового потока в центре отверстия защитной плиты, в плоскости, совпадающей с ее нижней поверхностью.

Радиационную панель устанавливают на вертикальных направляющих опорной станины. При этом расстояние от нижней кромки радиационной панели до верхней плоскости защитной плиты должно составлять 22 ± 1 мм.

Радиационная панель состоит из кожуха с теплоизолирующим слоем и нагревательного элемента. В качестве теплоизолирующего слоя используют негорючий минераловолокнистый материал.

Нагревательный элемент диаметром от 8 до 10 мм и длиной примерно 3,5 м (номинальная мощность 3 кВт) сворачивают в форме усеченного конуса и прикрепляют к внутренней поверхности кожуха.

На поверхности нагревательного элемента в двух диаметрально противоположных точках устанавливают два термоэлектрических преобразователя. Каждый из них прикрепляют к витку нагревательного элемента на расстоянии от 1/3 до 1/2 высоты кожуха радиационной панели от ее верхней кромки.

Способ крепления должен обеспечивать плотный контакт термоэлектрических преобразователей с поверхностью нагревательного элемента. Один из рекомендуемых способов крепления показан на рисунке 13.5.

Один из термоэлектрических преобразователей используют для регулирования температуры нагревателя (регулирующий термоэлектрический преобразователь), второй - для контроля температуры нагревателя (контролирующий термоэлектрический преобразователь).

Система зажигания

Подвижная горелка должна перемещаться из исходного положения над радиационной панелью в рабочее положение внутри панели. Конструкция подвижной горелки и система ее перемещения приведены на рисунках 13.6-13.8.

Вспомогательная горелка предназначена для зажигания подвижной горелки в случае ее затухания. Диаметр сопла вспомогательной горелки составляет от 1 до 2 мм.

В рабочем положении факел пламени подвижной горелки должен располагаться над центром отверстия в защитной плите в плоскости, перпендикулярной направлению перемещения горелки. При этом центр сопла горелки должен быть расположен на расстоянии 10 ± 1 мм от плоскости подвижной плиты.

Подвижная горелка должна перемещаться из исходного положения в рабочее положение каждые $4^{+0,4}$ с. Время нахождения горелки в рабочем положении должно составлять 1 с.

Вспомогательное оборудование

Держатель образца представляет собой плоский металлический лист, на верхней поверхности которого имеются бортики для установки и фиксации образца (рисунок 19.9). На нижней поверхности держателя имеются направляющие и стопор, фиксирующий положение держателя.

Экранирующая пластина (рисунок 13.10) предназначена для защиты поверхности образца от воздействия теплового потока. Экранирующую пластину изготавливают из листового алюминия или нержавеющей стали толщиной 2 мм.

Образец-имитатор изготавливают из негорючего минераловолокнистого материала плотностью 200 ± 50 кг/м³ (рисунок 13.11). Держатель образца-имитатора изготавливают из негорючего материала плотностью 825 ± 125 кг/м³.

Система регулирования расхода газозооушной смеси (рисунок 13.12) подклочается к источникам газообразного топлива (пропана или пропан-бутановой смеси) и воздуха, содержит игольчатые вентили, расходомеры с верхним пределом измерения не менее 1,2 л/ч (для газа) и не менее 12 л/ч (для воздуха) с погрешностью не более 4%. Рекомендуется также на линиях подачи топлива и воздуха размещать фильтры для защиты расходомеров от примесей.

Прибор, регулирующий температуру нагревательного элемента радиационной панели, должен быть рассчитан на мощность не менее 3 кВт и силу тока не менее 15 А. Для регистрации температуры рекомендуется использовать прибор с классом точности не менее 0,5.

Для измерения ППТП рекомендуется использовать прибор с диапазоном измерения от 1 до 75 кВт/м^2 , погрешность измерения - не более 5%. Для регистрации показаний измерителя теплового потока применяют регистрирующий прибор с классом точности не менее 0,1.

В качестве регистратора времени рекомендуется использовать приборы с диапазоном измерения до 1 ч, погрешность измерения должна составлять не более 1 с.

Место размещения установки оборудуют защитными экранами и вытяжной вентиляцией (рисунок 13.13). В вытяжном зонте устанавливают отражатель воздушного потока, обеспечивающий в зазорах скорость воздуха от 2 до 3 м/с при расходе воздуха от 0,25 до 0,35 $\text{м}^3/\text{с}$.

Калибровка установки

Общие положения

Цель калибровки состоит в установлении требуемых стандартом величин ППТП, а также равномерности его распределения в пределах экспонируемой поверхности образца.

Равномерность распределения теплового потока по экспонируемой поверхности образца обеспечивается при соблюдении следующих условий:

- отклонение ППТП в любых четырех диаметрально противоположных точках окружности диаметром 50 мм от величины ППТП в центре экспонируемой поверхности должно составлять не более $\pm 3\%$;
- отклонение ППТП в любых четырех диаметрально противоположных точках окружности диаметром 100 мм от величины ППТП в центре экспонируемой поверхности должно составлять не более $\pm 5\%$.

Установление требуемых стандартом величин ППТП проводят путем определения зависимости ППТП в центре экспонируемой поверхности от температуры нагревательного элемента.

Калибровку проводят на образцах (3 шт.), имеющих форму квадрата, со стороной 165 мм и отклонением минус 5 мм. Толщина калибровочного образца должна составлять не менее 20 мм. Для изготовления калибровочного образца используют асбестоцементные листы по ГОСТ 18124.

В калибровочных образцах вырезают отверстие для установки измерителя теплового потока: в первом образце - в центре, во втором образце - в любой точке окружности диаметром 50 мм, в третьем образце - в любой точке окружности диаметром 100 мм.

Калибровку проводят при метрологической аттестации установки или замене нагревательного элемента и/или термоэлектрических преобразователей.

Порядок проведения калибровки

При калибровке подвижная горелка должна находиться в исходном положении, вентили системы подачи топлива и воздуха перекрыты.

Устанавливают измеритель теплового потока в калибровочный образец с отверстием в центре экспонируемой поверхности.

Помещают калибровочный образец в держатель и устанавливают на подвижную платформу.

Включают электропитание и путем изменения мощности, подаваемой на нагревательный элемент радиационной панели, подбирают по регулируемому термоэлектрическому преобразователю величину термоЭДС, при которой в центре экспонируемой поверхности обеспечивается тепловой поток плотностью 50 кВт/м^2 .

Выдерживают установку в режиме нагрева по 8.2.4 не менее 10 мин и фиксируют величину термоЭДС контролирующего термоэлектрического преобразователя.

Повторяют операции по 8.2.4, 8.2.5 с целью определения величин термоЭДС, обеспечивающих в центре экспонируемой поверхности тепловые потоки плотностью 45, 40, 35, 30, 25, 20, 10, 5 кВт/м^2 .

После выполнения операций устанавливают измеритель теплового потока в калибровочный образец с отверстием на окружности диаметром 50 мм и повторяют операции для тепловых потоков плотностью 50, 40, 30, 20, 10 кВт/м^2 .

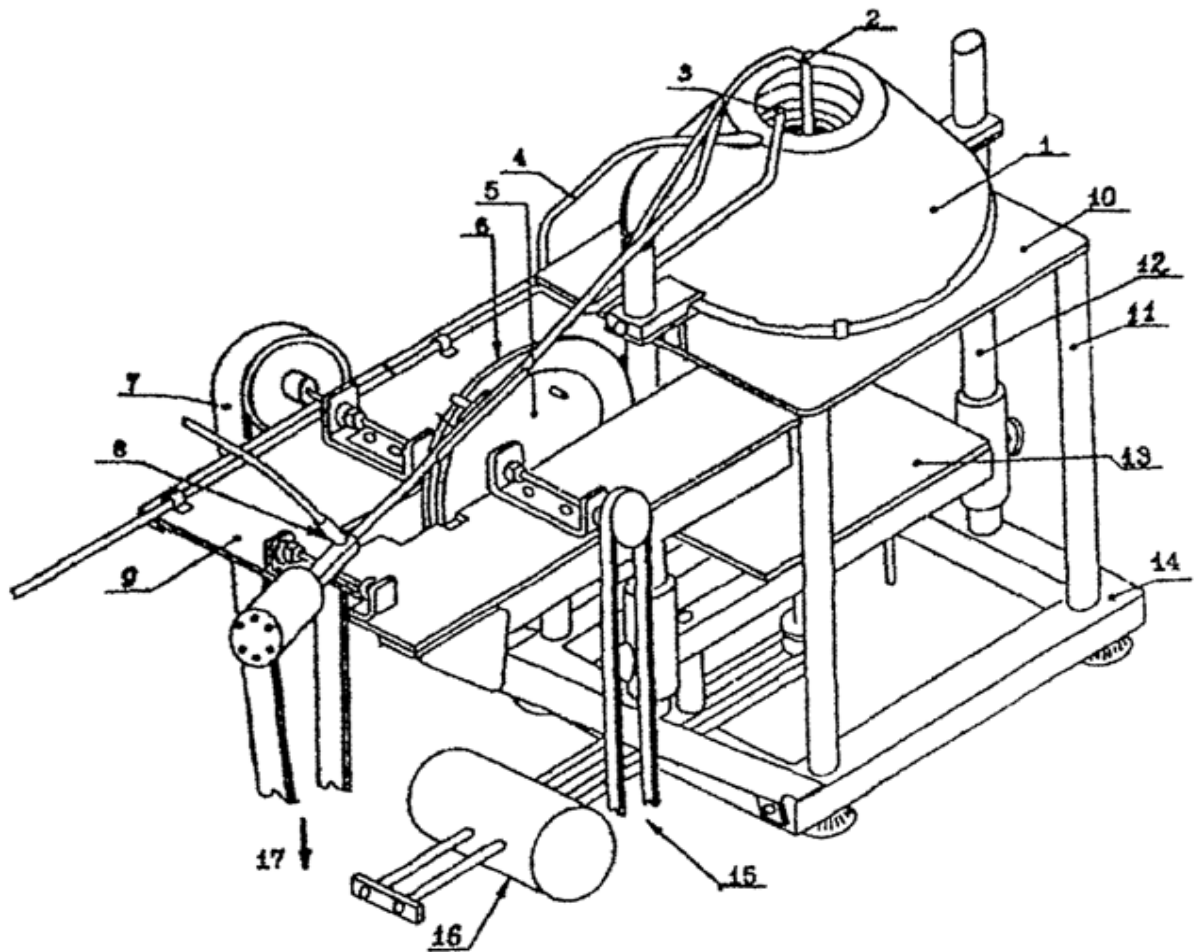
Указанные измерения повторяют для каждой из четырех диаметрально противоположных точек окружности, меняя положение образца в держателе.

Повторяют процедуру калибровки на калибровочном образце с отверстием на окружности диаметром 100 мм.

При несоответствии результатов измерений ППТП требованиям следует заменить нагревательный элемент радиационной панели.

Контроль калибровки установки проводят через каждые 60 ч работы радиационной панели по величине ППТП, равной 30 кВт/м^2 , в центре экспонируемой поверхности.

Калибровку установки повторяют в том случае, если отклонение измеренной величины ППТП составляет более 0,06 кВт/м^2 .



1 — радиационная панель с нагревательным элементом; 2 — подвижная горелка; 3 — вспомогательная стационарная горелка; 4 — силовой кабель нагревательного элемента; 5 — кулачок с ограничителем хода для ручного управления подвижной горелкой; 6 — кулачок для автоматического управления подвижной горелкой; 7 — приводной ремень; 8 — втулка для подсоединения подвижной горелки к системе подачи топлива; 9 — монтажная плита для системы зажигания и системы перемещения подвижной горелки; 10 — защитная плита; 11 — вертикальная опора; 12 — вертикальная направляющая; 13 — подвижная платформа для образца; 14 — основание опорной станины; 15 — ручное управление; 16 — рычаг с противовесом; 17 — привод к электродвигателю

Рисунок А1 — Общий вид установки для испытаний на воспламеняемость

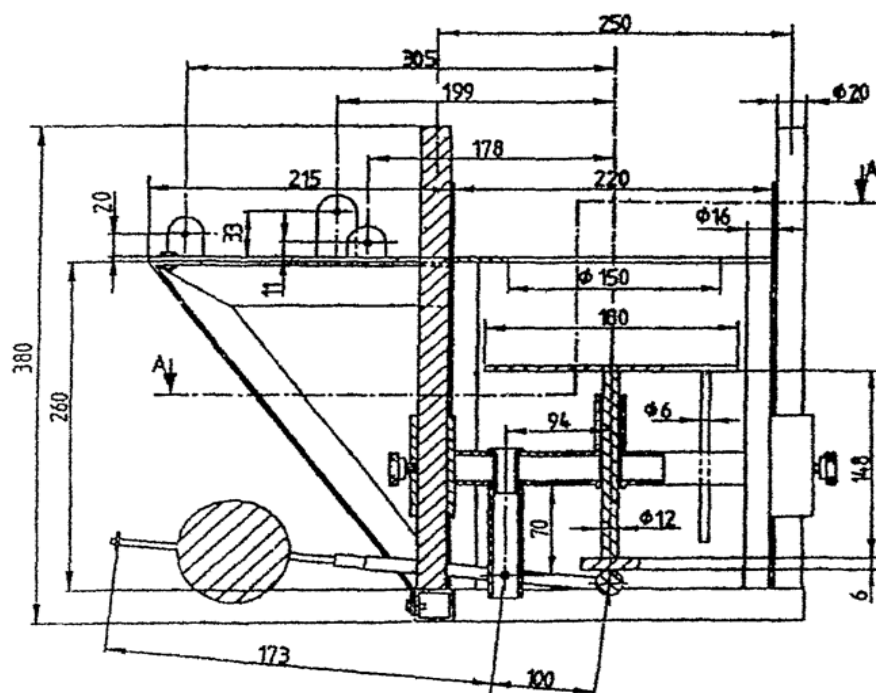


Рисунок А2 — Опорная станина (разрез по ВВ)

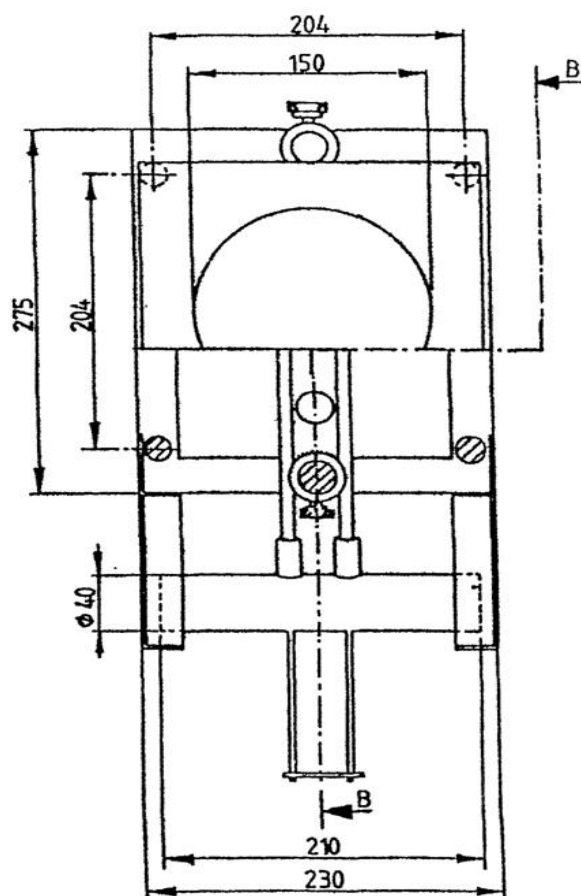
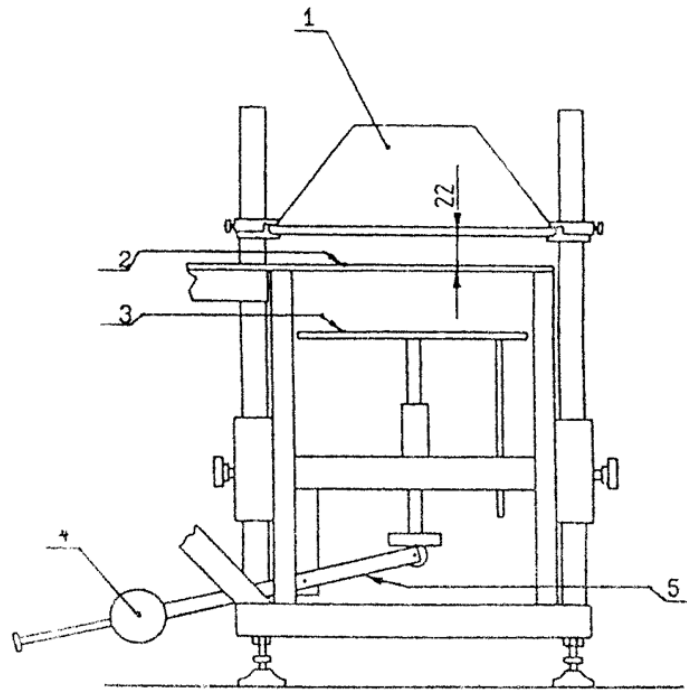
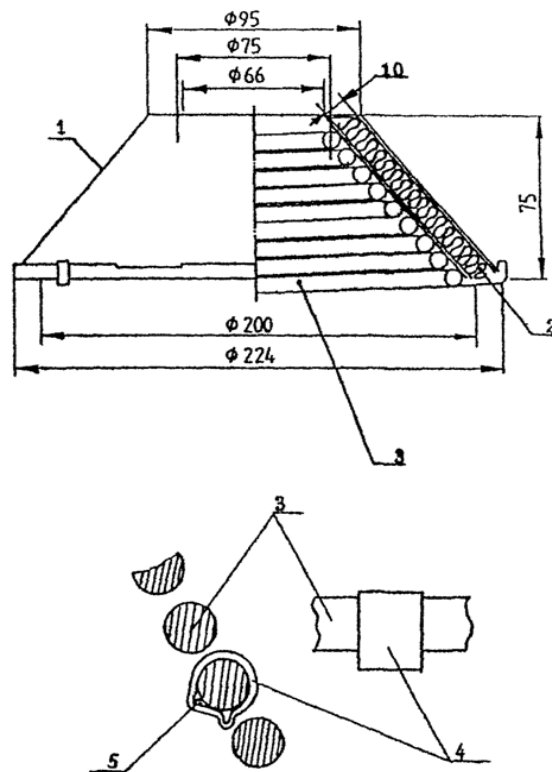


Рисунок А3 — Опорная станина (разрез по АА)



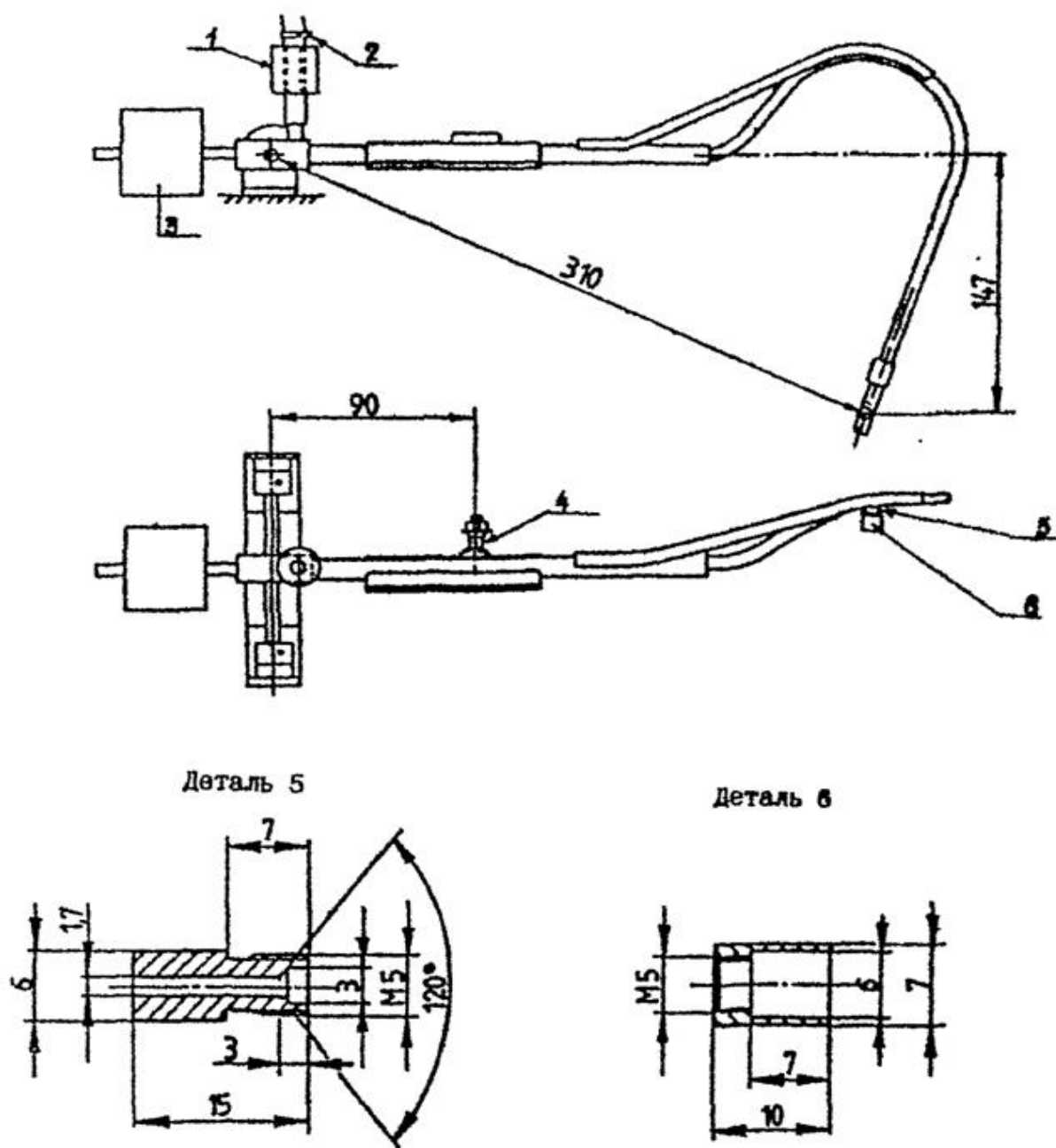
1 — радиационная панель; 2 — защитная плита; 3 — подвижная платформа;
4 — противовес; 5 — рычаг

Рисунок А4 — Опорная станина и радиационная панель



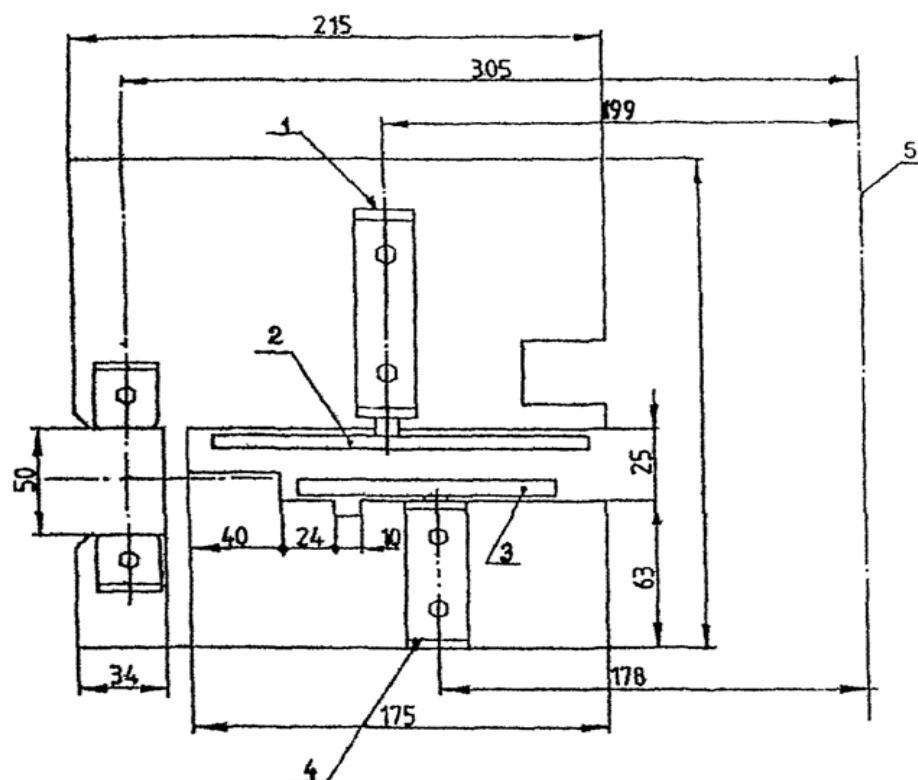
1 — кожух с теплоизолирующим слоем, 2 — теплоизолирующий слой из минерального волокна, 3 — нагревательный элемент, 4 — хомут, 5 — термоэлектрический преобразователь

Рисунок А5 — Радиационная панель



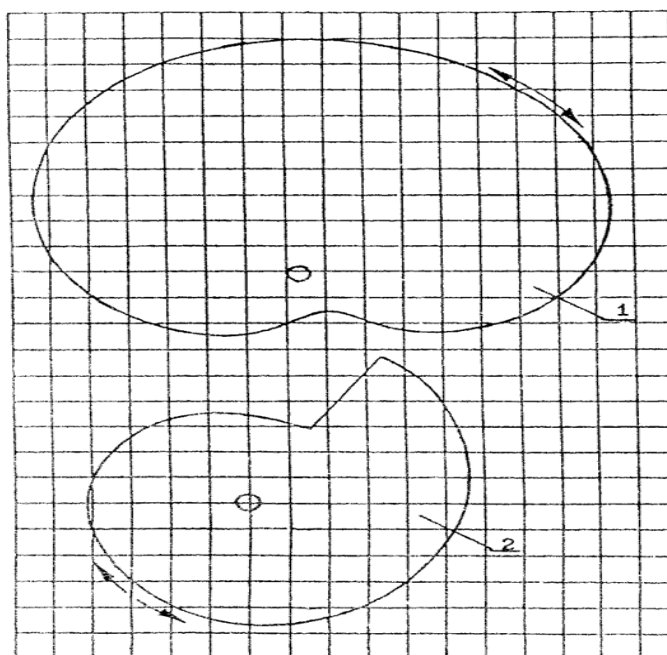
1 — втулка для присоединения подвижной горелки к системе питания топливом;
 2 — гибкий шланг; 3 — противовес; 4 — ролик; 5 — сопло; 6 — стабилизатор пламени

Рисунок А6 — Подвижная горелка



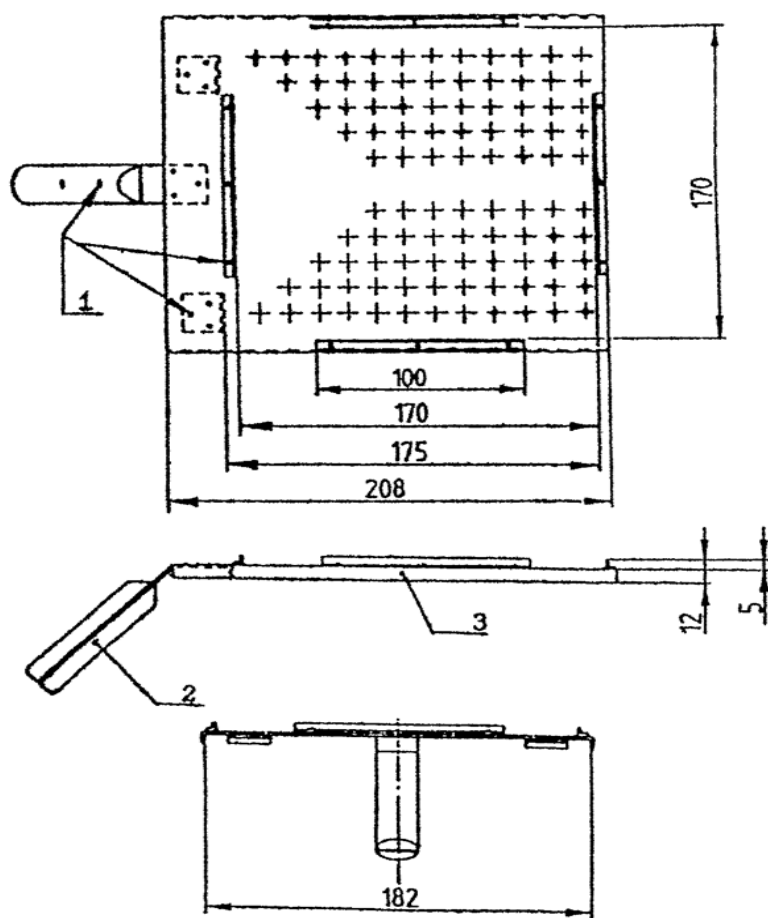
1 — вал приводного механизма; 2 — кулачок приводного механизма; 3 — кулачок с ограничителем хода; 4 — вал ручного управления; 5 — линия, проходящая через центр радиационной панели

Рисунок А7 — Монтажная плита системы перемещения подвижной горелки



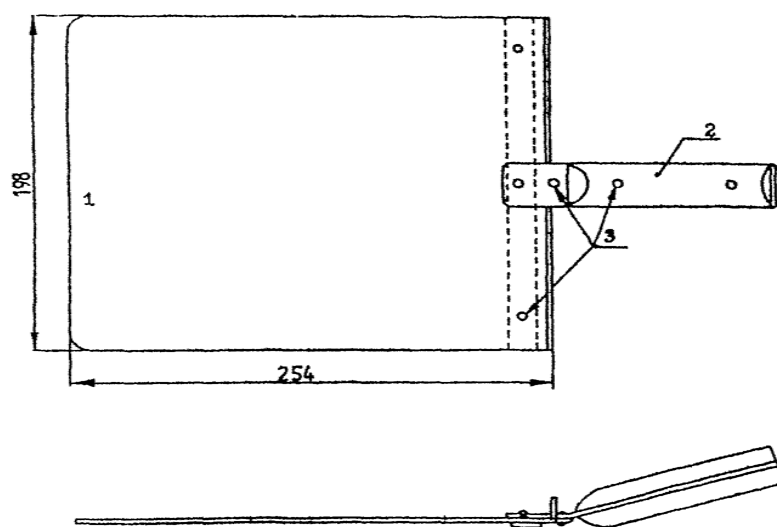
1 — кулачок приводного механизма; 2 — кулачок с ограничителем хода

Рисунок А8 — Механизм привода подвижной горелки (сетка со стороной квадрата 10 мм)



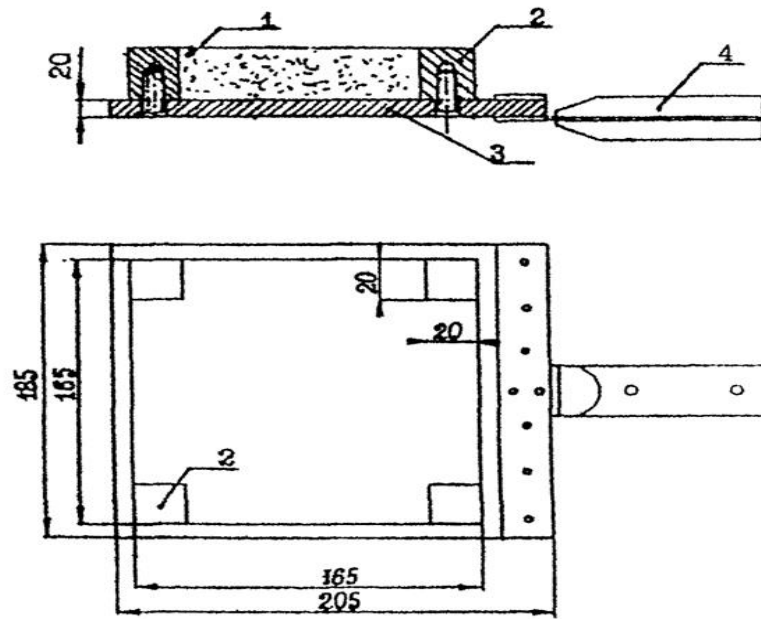
1 — заклепки; 2 — рукоятка; 3 — металлический лист (толщина 0,7)

Рисунок А9 — Держатель образца



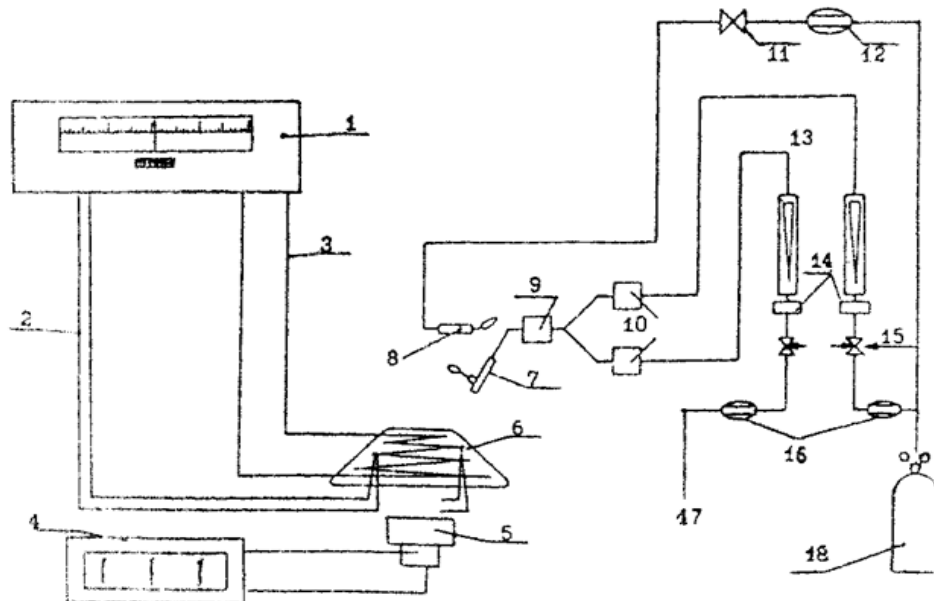
1 — плоский лист из алюминия или нержавеющей стали (толщина 2 мм); 2 — рукоятка; 3 — заклепки

Рисунок А10 — Экранирующая пластина



1 — плита из минерального волокна, 2 — угловая стойка с самонарезным винтом, 3 — основание образца имитатора; 4 — рукоятка

Рисунок А11 -- Образец-имитатор



1 — регулятор температуры; 2 — подключение термопар; 3 — подводка электропитания; 4 — милливольтметр; 5 — измеритель теплового потока; 6 — радиационная панель; 7 — подвижная горелка; 8 — вспомогательная горелка; 9 — втулка для подсоединения подвижной горелки к системе питания топливом; 10 — невозвратные клапаны; 11 — игольчатый вентиль; 12 — редуктор; 13 — расходомеры; 14 — фильтры; 15 — игольчатые вентили; 16 — редукторы-регуляторы давления; 17 — подвод сжатого воздуха; 18 — пропан

Рисунок А12 -- Принципиальная схема установки и вспомогательного оборудования

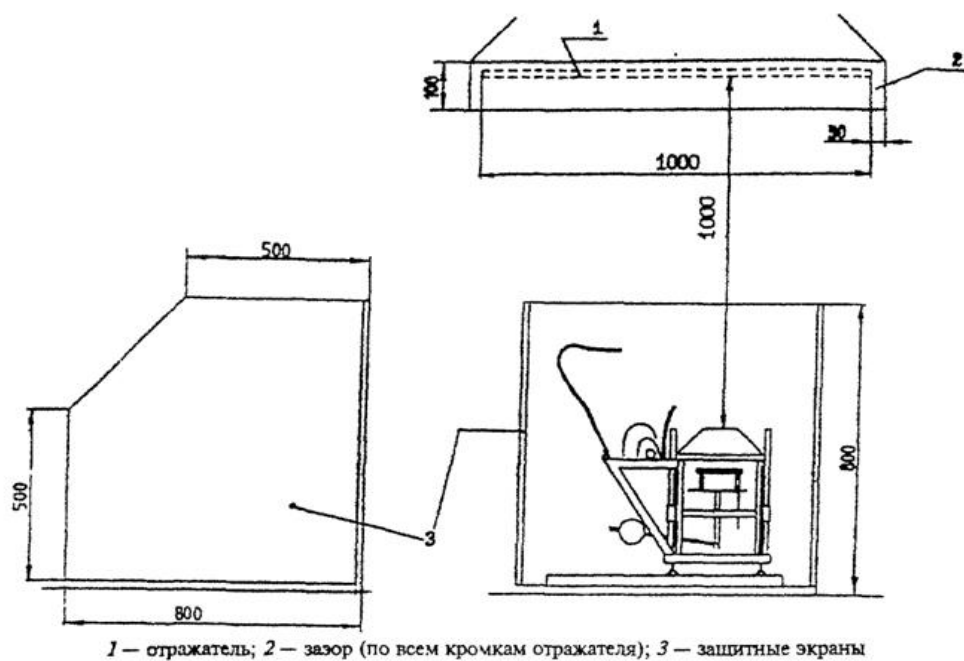


Рисунок А13 — Вытяжной зонт и защитный экран установки для испытаний на воспламеняемость

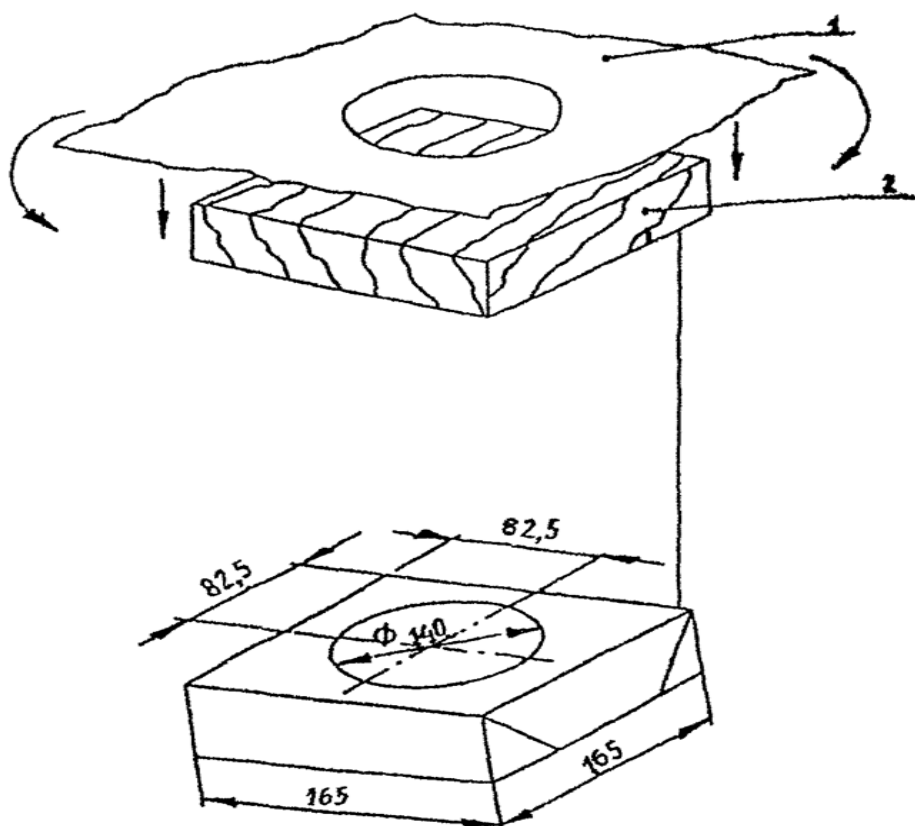


Рисунок А14 — Подготовка образца к испытанию

5. Указания по технике безопасности

1. При работе в лаборатории необходимо быть внимательным и соблюдать исключительную осторожность. Недостаточное знакомство с приборами и свойствами веществ, неаккуратность и отступление от правил техники безопасности и порядка проведения работы могут повлечь за собой тяжелые последствия.

Приступать к выполнению лабораторной работы разрешается только после инструктажа и соответствующей записи в журнале.

Слушатель обязан: строго соблюдать порядок выполнения работы, убрать с рабочего места все посторонние предметы, выяснить у преподавателя все возникающие в процессе работы вопросы.

2. Во избежание случайных отравлений запрещается пользоваться для питья лабораторной посудой.

3. Запрещается набирать пипеткой при помощи рта испытуемые жидкости; для этого следует пользоваться резиновой грушей.

4. Категорически запрещается сливать в канализацию огнеопасные жидкости, засорять грязью, твердыми предметами (бумага, древесина, битое стекло) раковины канализации.

5. В лаборатории категорически запрещается:

а) мыть оборудование, пол, столы бензином, керосином и другими легковоспламеняющимися и горючими жидкостями;

б) хранить тряпки, другие предметы, смоченные легковоспламеняющимися жидкостями.

6. Строго воспрещается проводить вблизи огня какие-либо работы, кроме предусмотренных описанием.

7. При пользовании газовыми горелками следует соблюдать следующие правила:

чтобы зажечь горелку надо немного открыть кран, выждать 2-3 с и затем к выходному отверстию поднести пламя спички или электрозажигалки. Если от неправильного зажигания горелки пламя «проскакивает», т.е. горит внутри горелки, ее следует немедленно погасить, дать ей остыть и только после этого зажечь снова.

8. Действующие электронагревательные приборы нельзя оставлять без присмотра.

9. Все работы с легковоспламеняющимися и горючими жидкостями должны проводиться в вытяжном шкафу или под вытяжным зонтом при работающей вентиляции.

10. Категорически запрещается нагревать на открытом огне сосуды, содержащие низкокипящие огнеопасные жидкости.

11. При нагревании ЛВЖ в количестве более 0,5 л необходимо под прибор ставить кювету достаточной емкости для предотвращения разлива жидкости в случае аварии.

12. В случае внезапного прекращения подачи воды на охлаждение приборов с ЛВЖ и ГЖ горелки должны быть потушены, а электрический ток выключен.

13. После окончания работы необходимо проверить:

а) закрыты ли газовые и водяные краны;

б) потушены ли горелки и другие огневые приборы, выключены ли электронагревательные приборы;

в) закрыты ли пробками бутылки и банки с реактивами и другими жидкостями и материалами.

14. Необходимо ознакомиться с местом нахождения в лаборатории огнетушителя, ящика с песком, асбестополотна и др.

15. В качестве первоочередной помощи при тепловом ожоге обожженное место необходимо смочить раствором перманганата калия, затем смазать мазью от ожогов, вазелином или раствором пищевой соды (бикарбонатом натрия) и перевязать бинтом.

Помещение, в котором проводят испытания, должно быть оборудовано приточно-вытяжной вентиляцией. Рабочее место оператора должно удовлетворять требованиям электробезопасности по ГОСТ 12.1.019 и санитарно-гигиеническим требованиям по ГОСТ 12.1.005.

6. Задания

1. Экспериментальная часть.

Образец для испытания, кондиционированный в соответствии с 6.7, оборачивают листом алюминиевой фольги (номинальная толщина 0,2 мм), в центре которого вырезано отверстие диаметром 140 мм. При этом центр отверстия в фольге должен совпадать с центром экспонируемой поверхности образца (рисунок 13.14).

Образец для испытания помещают в держатель, устанавливают его на подвижную платформу и производят регулировку противовеса. После этого держатель с образцом для испытания заменяют держателем с образцом-имитатором.

Устанавливают подвижную горелку в исходное положение, регулируют расход газа (19-20 мл/мин) и воздуха (160-180 мл/мин), подаваемых в подвижную горелку. Для вспомогательной горелки длина факела пламени составляет примерно 15 мм.

Включают электропитание и по регулирующему термоэлектрическому преобразователю задают установленную при калибровке величину термоЭДС, соответствующую ППТП 30 кВт/м^2 .

После достижения заданной величины термоЭДС установку выдерживают в этом режиме не менее 5 мин. При этом величина термоЭДС, зафиксированная по контролируемому термоэлектрическому преобразователю, должна отличаться от полученной при калибровке не более чем на 1%.

Помещают экранирующую пластину на защитную плиту, заменяют образец-имитатор на образец для испытания, включают механизм подвижной горелки, удаляют экранирующую пластину и включают регистратор времени.

Время проведения этих операций должно составлять не более 15 с.

По истечении 15 мин или при воспламенении образца испытание прекращают. Для этого помещают экранирующую пластину на защитную плиту, останавливают регистратор времени и механизм подвижной горелки, удаляют держатель с образцом и помещают на подвижную платформу образец-имитатор, убирают экранирующую пластину.

7. Содержание отчета

Обработка результатов.

Устанавливают величину ППТП 20 кВт/м^2 , если в предыдущем испытании зафиксировано воспламенение, или 40 кВт/м^2 при его отсутствии.

Если при ППТП 20 кВт/м^2 зафиксировано воспламенение, уменьшают величину ППТП до 10 кВт/м^2 и повторяют операции.

Если при ППТП 40 кВт/м^2 воспламенение отсутствует, устанавливают величину ППТП 50 кВт/м^2 и повторяют операции.

После определения двух величин ППТП, при одной из которых наблюдается воспламенение, а при другой - отсутствует, задают величину ППТП на 5 кВт/м^2 больше той величины, при которой воспламенение отсутствует, и повторяют операции на трех образцах.

Если при ППТП 10 кВт/м^2 зафиксировано воспламенение, то следующее испытание проводят при ППТП 5 кВт/м^2 .

В зависимости от результатов испытаний величину ППТП увеличивают на 5 кВт/м^2 (при отсутствии воспламенения) или уменьшают на 5 кВт/м^2 (при наличии воспламенения) и повторяют операции на двух образцах.

Для каждого испытанного образца фиксируют время воспламенения и следующие дополнительные наблюдения: время и место воспламенения; процесс разрушения образца под действием теплового излучения и пламени; плавление, вспучивание, расслоение, растрескивание, набухание либо усадка.

Для материалов, приобретающих при нагревании способность к прилипанию либо образующих поверхностный обугленный слой с низкой механической прочностью, либо содержащих под экспонируемой поверхностью воздушный зазор, с целью предотвращения помех перемещению подвижной горелки либо повреждения горелкой экспонируемой поверхности образца испытания следует проводить с использованием в приводном механизме стопора, устраняющего возможность контакта подвижной горелки с поверхностью образца.

Для материалов, образующих значительное количество дыма или продуктов разложения, гасящих пламя подвижной горелки и исключающих возможность повторного ее зажигания с помощью вспомогательной горелки, результат фиксируют в протоколе испытания с указанием отсутствия воспламенения вследствие систематического гашения пламени подвижной горелки продуктами разложения.

В протоколе испытания приводят следующие данные:

- наименование испытательной лаборатории;
- наименование заказчика;
- наименование изготовителя (поставщика);
- описание материала или изделия, техническую документацию, а также торговую марку, состав, толщину, плотность, массу и способ изготовления образцов, характеристику экспонируемой поверхности, для слоистых материалов - толщину каждого слоя и характеристику материала каждого слоя;
- параметры воспламеняемости: ППТП, время воспламенения при ППТП для каждого из образцов;
- вывод о группе воспламеняемости материала с указанием величины КППТП;
- дополнительные наблюдения при испытании образца: время и место воспламенения; процесс разрушения образца под действием теплового излучения и пламени; плавление, вспучивание, расслоение, растрескивание, набухание либо усадка.

8. Контрольные вопросы

1. Что такое воспламеняемость?
2. Что такое воспламенение?
3. Что такое устойчивое пламенное горение?
4. Что такое время воспламенения?
5. Что такое поверхностная плотность теплового потока?
6. Что такое критическая поверхностная плотность теплового потока?
7. Что такое экспонируемая поверхность?
8. Перечислите параметры воспламеняемости.
9. Приведите классификацию строительных материалов по группам воспламеняемости.
10. Чему равны плотность лучистого теплового потока и начальная плотность лучистого теплового потока при испытании?

ГОСТ 30402-96* Материалы строительные. Метод испытания на воспламеняемость.

9. Список литературы, рекомендуемый к использованию по данной теме

Основная литература

1. Кукин, П. П. Теория горения и взрыва : учебное пособие / П. П. Кукин, В. В. Юшин, С. Г. Емельянов ; Юго-Западный гос. ун-т, Рос. гос. технолог. ун-т им. К. Э. Циолковского (МАТИ-РГТУ). – М. : Юрайт, 2015. – 435 с. : ил., табл. – (Бакалавр). – Гриф: Доп. УМО. – Библиогр.: с. 433-435. – ISBN 978-5-9916-2722-1

2. Теория горения и взрывов [Электронный ресурс] : практикум / . — Электрон. текстовые данные. — Новосибирск: Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики, 2015. — 97 с. — 2227-8397. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/55503.html>

Дополнительная литература

1. Девисилов, В. А. Теория горения и взрыва : практикум : учеб. пособие для вузов / В.А. Девисилов, Т.И. Дроздова, С.С. Тимофеева. – Москва : ФОРУМ, 2012. – 351 с. : ил. ; 22. – (Высшее образование). – Гриф: Рек. УМО. – Библиогр.: с. 286-287. – ISBN 978-5-91134-555-6

2. Горев В.А. Теория горения и взрыва [Электронный ресурс] : учебное пособие / В.А. Горев. — Электрон. текстовые данные. — М. : Московский государственный строительный университет, ЭБС АСВ, 2010. — 200 с. — 2227-8397. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/16330.html>

3. Матерова С.И. Химия процессов горения [Электронный ресурс] : учебное пособие / С.И. Матерова. — Электрон. текстовые данные. — Железногорск: Сибирская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, 2017. — 63 с. — 2227-8397. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/66930.html>

Лабораторная работа № 14, 15

Измерение критической поверхностной плотности теплового потока и времени воспламенения. Испытания материалов на распространение пламени

1. Цель работы

Цель работы: провести испытания материалов на распространение пламени и определить критическую поверхностную плотность теплового потока и времени воспламенения.

2. Формируемые компетенции или их части

Способен определять круг задач в рамках поставленной цели и выбирать оптимальные способы их решения, исходя из действующих правовых норм, имеющихся ресурсов и ограничений (УК-2); способен учитывать современные тенденции развития техники и технологий в области техносферной безопасности, измерительной и вычислительной техники, информационных технологий при решении типовых задач в области профессиональной деятельности, связанной с защитой окружающей среды и обеспечением безопасности человека (ОПК-1).

3. Теоретическая часть

Время воспламенения – время от начала воздействия пламени источника зажигания на образец до его воспламенения.

Распространение пламени – распространение пламенного горения по поверхности образца в результате воздействия.

Длина распространения пламени (L) – максимальная величина повреждения поверхности образца в результате распространения пламенного горения.

Экспонируемая поверхность – поверхность образца, подвергающаяся воздействию лучистого теплового потока и пламени от источника зажигания при испытании на распространение пламени.

Поверхностная плотность теплового потока (ППТП) – лучистый тепловой поток, воздействующий на единицу поверхности образца.

Критическая поверхностная плотность теплового потока (КППТП) – величина теплового потока, при которой прекращается распространение пламени.

Сущность метода состоит в определении критической поверхностной плотности теплового потока, величину которого устанавливают по длине распространения пламени по образцу в результате воздействия теплового потока на его поверхность.

Горючие строительные материалы (по [ГОСТ 30244](#)) в зависимости от величины КППТП подразделяют на четыре группы распространения пламени: РП1, РП2, РП3, РП4 (таблица 14.1).

Таблица 14.1 – Группы распространения пламени

Группа распространения пламени	КППТП, кВт/м ²
РП1	11,0 и более
РП2	от 8,0, но менее 11,0
РП3	от 5,0, но менее 8,0
РП4	менее 5,0

4. Оборудование и материалы

Для испытания изготавливают 5 образцов материала размером 1100 x 250 мм. Для анизотропных материалов изготавливают 2 комплекта образцов (например, по утку и по основе).

Образцы для стандартного испытания изготавливают в сочетании с негорючей основой. Способ крепления материала к основе должен соответствовать используемому в реальных условиях.

В качестве негорючей основы следует применять асбестоцементные листы по [ГОСТ 18124](#) толщиной 10 или 12 мм.

Толщина образца с негорючей основой должна составлять не более 60 мм.

В тех случаях, когда техническая документация не предусматривает использование материала по негорючему основанию, образцы изготавливают с основой и креплением, соответствующими реальным условиям применения.

Кровельные мастики, а также мастичные покрытия пола следует наносить на основу в соответствии с технической документацией, но не менее, чем в четыре слоя, при этом расход материала при нанесении на основу каждого слоя должен соответствовать принятому в технической документации.

Образцы полов, применяемых с лакокрасочными покрытиями, следует изготавливать с этими покрытиями, нанесенными в четыре слоя.

Образцы кондиционируют при температуре $(20 \pm 5)^\circ\text{C}$ и относительной влажности $(65 \pm 5)\%$ не менее 72 ч.

Схема установки для испытаний на распространение пламени приведена на рисунке 14.1.

Установка состоит из следующих основных частей:

- 1) испытательная камера с дымоходом и вытяжным зонтом;
- 2) источник лучистого теплового потока (радиационная панель);
- 3) источник зажигания (газовая горелка);
- 4) держатель образца и устройство для введения держателя в испытательную камеру (платформа).

Установку оборудуют приборами для регистрации и измерения температуры в испытательной камере и дымоходе, величины поверхностной плотности теплового потока, скорости потока воздуха в дымоходе.

Испытательную камеру и дымоход (рисунок 14.1) изготавливают из листовой стали толщиной от 1,5 до 2 мм и облицовывают изнутри негорючим теплоизоляционным материалом толщиной не менее 10 мм.

Переднюю стенку камеры оборудуют дверцей со смотровым окном из термостойкого стекла. Размеры смотрового окна должны обеспечивать возможность наблюдения за всей поверхностью образца.

Дымоход соединяется с камерой через проем. Над дымоходом устанавливают зонт вытяжной вентиляции.

Производительность вытяжного вентилятора должна составлять не менее 0,5 куб.м /с.

Радиационная панель имеет следующие размеры:

длина.....(450±10) мм;

ширина.....(300±10) мм.

Электрическая мощность радиационной панели должна составлять не менее 8 кВт.

Угол наклона радиационной панели (рисунок 14.2) к горизонтальной плоскости должен составлять (30±5)°.

Источником зажигания является газовая горелка с диаметром выходного отверстия (1,0±0,1) мм, обеспечивающая формирование факела пламени длиной от 40 до 50 мм. Конструкция горелки должна обеспечивать возможность ее вращения относительно горизонтальной оси. При испытании пламя газовой горелки должно касаться точки «ноль» («0») продольной оси образца (рисунок 14.2).

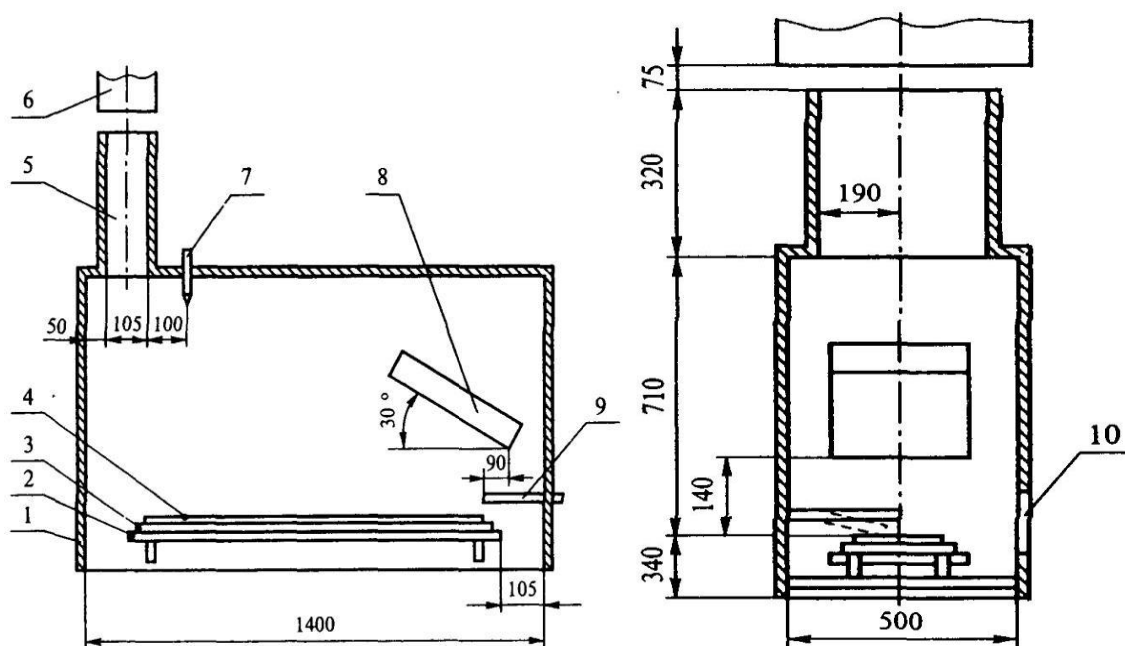


Рисунок 14.1 – Установка для испытаний для распространения пламени
 1 – испытательная камера; 2 – платформа; 3 – держатель образца; 4 – образец;
 5 – дымоход; 6 – вытяжной зонт; 7 – термопара; 8 – радиационная панель;
 9 – газовая горелка; 10 – дверца со смотровым окном

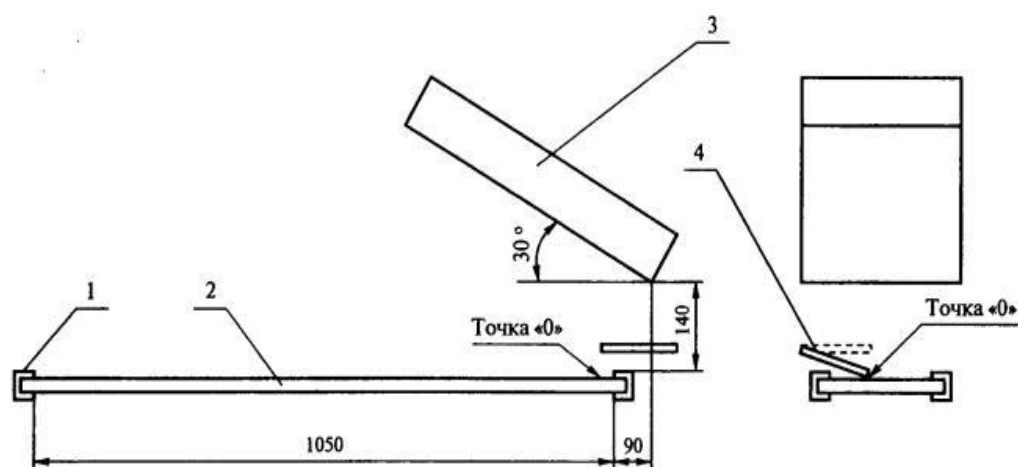


Рисунок 14.2 – Схема взаимного расположения радиационной панели, образца и газовой горелки

1 – держатель; 2 – образец; 3 – радиационная панель; 4 – газовая горелка

Платформу для размещения держателя образца изготавливают из жаропрочной или нержавеющей стали. Платформу устанавливают на направляющих в нижней части камеры вдоль ее продольной оси. По всему периметру камеры между ее стенками и краями платформы следует обеспечить зазор общей площадью $(0,24 \pm 0,04)$ кв.м.

Расстояние от экспонируемой поверхности образца до потолка камеры должно составлять (710 ± 10) мм.

Держатель образца изготавливают из жаропрочной стали толщиной $(2,0 \pm 0,5)$ мм и оснащают приспособлениями для крепления образца (рисунок 20.3).

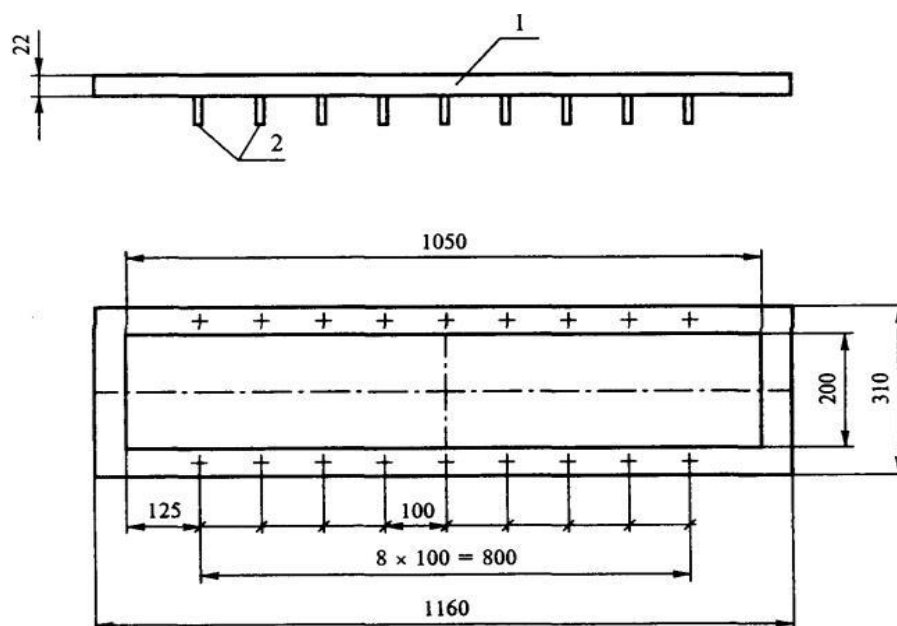


Рисунок 14.3 – Держатель образца
1 – держатель; 2 – крепежные элементы

Для измерения температуры в камере (рисунок 14.1) используют термоэлектрический преобразователь по ГОСТ 3044 с диапазоном измерения от 0 до 600 °С и толщиной не более 1 мм. Для регистрации показаний термоэлектрического преобразователя используют приборы с классом точности не более 0,5.

Для измерения ППТП используют водоохлаждаемые приемники теплового излучения с диапазоном измерения от 1 до 15 кВт/кв.м. Погрешность измерения должна составлять не более 8%.

Для регистрации показаний приемника теплового излучения используют регистрирующий прибор с классом точности не более 0,5.

Для измерения и регистрации скорости потока воздуха в дымоходе используют анемометры с диапазоном измерения от 1 до 3 м/с и основной относительной погрешностью не более 10 %.

Калибровка образца

Цель калибровки состоит в установлении требуемых настоящим стандартом величин ППТП в контрольных точках калибровочного образца (рисунок 14.4 и таблица 14.2) и распределении ППТП по поверхности образца при скорости потока воздуха в дымоходе $(1,22 \pm 0,12)$ м/с.

Таблица 14.2 – Контрольные точки

Контрольная точка	ППТП, кВт/кв.м
L1	$9,1 \pm 0,8$
L2	$5,0 \pm 0,4$
L3	$2,4 \pm 0,2$

Калибровку проводят на образце, изготовленном из асбестоцементных листов по ГОСТ 18124, толщиной от 10 до 12 мм (рисунок 14.4).

Калибровку проводят при метрологической аттестации установки или замене нагревательного элемента радиационной панели.

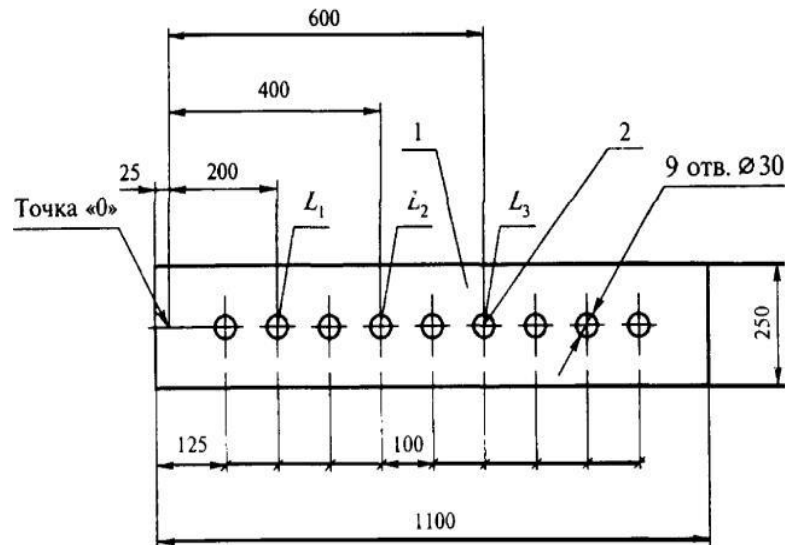


Рисунок 14.4 – Калибровочный образец

1 – калибровочный образец; 2 – отверстия для измерителя теплового потока

Порядок проведения калибровки

Устанавливают в дымоходе скорость потока воздуха от 1,1 до 1,34 м/с. Для этого выполняют следующее:

- помещают в дымоход анемометр так, чтобы его входное отверстие располагалось по оси дымохода на расстоянии (70 ± 10) мм от верхнего края дымохода. Анемометр следует жестко фиксировать в установленном положении;
- закрепляют калибровочный образец в держателе образца и устанавливают его на платформу, вводят платформу в камеру и закрывают дверцу;
- измеряют скорость потока воздуха и, при необходимости, путем регулирования расхода воздуха в вентиляционной системе устанавливают требуемую скорость потока воздуха в дымоходе, после чего анемометр удаляют из дымохода.

При этом радиационную панель и газовую горелку не включают.

После проведения работ устанавливают величины ППТП в соответствии с таблицей 20.2. С этой целью выполняют следующее:

- включают радиационную панель и прогревают камеру до достижения теплового баланса. Тепловой баланс считают достигнутым, если температура в камере (рисунок 14.1) изменяется не более чем на 7°C в течение 10 мин;
- устанавливают в отверстие калибровочного образца в контрольной точке L2 (рисунок 14.4) приемник теплового излучения так, чтобы поверхность чувствительного элемента совпадала с верхней плоскостью калибровочного образца. Показания приемника теплового излучения регистрируют через (30 ± 10) с;
- при несоответствии измеренной величины ППТП требованиям, указанным в таблице 14.2, регулируют мощность радиационной панели для достижения теплового баланса и повторяют измерения ППТП;
- описанные выше операции повторяют до достижения величины ППТП, требуемой настоящим стандартом для контрольной точки L2.

Операции повторяют для контрольных точек L1 и L3 (рисунок 14.4). При соответствии результатов измерений требованиям таблицы 20.2 проводят измерения ППТП в точках, расположенных на расстоянии 100, 300, 500, 700, 800 и 900 мм от точки «0».

По результатам калибровки строят график распределения величин ППТП по длине образца.

5. Указания по технике безопасности

1. При работе в лаборатории необходимо быть внимательным и соблюдать исключительную осторожность. Недостаточное знакомство с приборами и свойствами веществ, неаккуратность и отступление от правил техники безопасности и порядка проведения работы могут повлечь за собой тяжелые последствия.

Приступать к выполнению лабораторной работы разрешается только после инструктажа и соответствующей записи в журнале.

Слушатель обязан: строго соблюдать порядок выполнения работы, убрать с рабочего места все посторонние предметы, выяснить у преподавателя все возникающие в процессе работы вопросы.

2. Во избежание случайных отравлений запрещается пользоваться для питья лабораторной посудой.

3. Запрещается набирать пипеткой при помощи рта испытуемые жидкости; для этого следует пользоваться резиновой грушей.

4. Категорически запрещается сливать в канализацию огнеопасные жидкости, засорять грязью, твердыми предметами (бумага, древесина, битое стекло) раковины канализации.

5. В лаборатории категорически запрещается:

а) мыть оборудование, пол, столы бензином, керосином и другими легковоспламеняющимися и горючими жидкостями;

б) хранить тряпки, другие предметы, смоченные легковоспламеняющимися жидкостями.

6. Строго воспрещается проводить вблизи огня какие-либо работы, кроме предусмотренных описанием.

7. При пользовании газовыми горелками следует соблюдать следующие правила:

чтобы зажечь горелку надо немного открыть кран, выждать 2-3 с и затем к выходному отверстию поднести пламя спички или электрозажигалки. Если от неправильного зажигания горелки пламя «проскакивает», т.е. горит внутри горелки, ее следует немедленно погасить, дать ей остыть и только после этого зажечь снова.

8. Действующие электронагревательные приборы нельзя оставлять без присмотра.

9. Все работы с легковоспламеняющимися и горючими жидкостями должны проводиться в вытяжном шкафу или под вытяжным зонтом при работающей вентиляции.

10. Категорически запрещается нагревать на открытом огне сосуды, содержащие низкокипящие огнеопасные жидкости.

11. При нагревании ЛВЖ в количестве более 0,5 л необходимо под прибор ставить кювету достаточной емкости для предотвращения разлива жидкости в случае аварии.

12. В случае внезапного прекращения подачи воды на охлаждение приборов с ЛВЖ и ГЖ горелки должны быть потушены, а электрический ток выключен.

13. После окончания работы необходимо проверить:

а) закрыты ли газовые и водяные краны;

б) потушены ли горелки и другие огневые приборы, выключены ли электронагревательные приборы;

в) закрыты ли пробками бутылки и банки с реактивами и другими жидкостями и материалами.

14. Необходимо ознакомиться с местом нахождения в лаборатории огнетушителя, ящика с песком, асбестополотна и др.

15. В качестве первоочередной помощи при тепловом ожоге обожженное место необходимо смочить раствором перманганата калия, затем смазать мазью от ожогов, вазелином или раствором пищевой соды (бикарбонатом натрия) и перевязать бинтом.

Помещение, в котором проводят испытания, должно быть оборудовано приточно-вытяжной вентиляцией. Рабочее место оператора должно удовлетворять требованиям электробезопасности по ГОСТ 12.1.019 и санитарно-гигиеническим требованиям по ГОСТ 12.1.005.

6. Задания

1. Экспериментальная часть.

Подготовку установки к испытаниям проводят по алгоритму. После этого открывают дверцу камеры, зажигают газовую горелку и располагают ее так, чтобы расстояние между факелом пламени и экспонируемой поверхностью составляло не менее 50 мм.

Устанавливают образец в держатель, фиксируют его положение с помощью приспособлений для крепления, помещают держатель с образцом на платформу и вводят в камеру.

Закрывают дверцу камеры и включают секундомер. После выдержки в течение 2 мин приводят пламя горелки в контакт с образцом в точке «0», расположенной по центральной оси образца. Оставляют факел пламени в этом положении в течение $(10 \pm 0,2)$ мин. По истечении этого времени возвращают горелку в исходное положение.

При отсутствии воспламенения образца в течение 10 мин испытание считают законченным.

В случае воспламенения образца испытание заканчивают при прекращении пламенного горения или по истечении 30 мин от начала воздействия на образец газовой горелки путем принудительного гашения.

В процессе испытания фиксируют время воспламенения и продолжительность пламенного горения.

После окончания испытания открывают дверцу камеры, выдвигают платформу, извлекают образец.

Испытание каждого последующего образца проводят после охлаждения держателя образца до комнатной температуры и проверки соответствия ППТП в точке L2 требованиям, указанным в таблице 14.2.

Измеряют длину поврежденной части образца по его продольной оси для каждого из пяти образцов. Измерения проводят с точностью до 1 мм.

Повреждением считается выгорание и обугливание материала образца в результате распространения пламенного горения по его поверхности. Оплавление, коробление, спекание, вспучивание, усадка, изменение цвета, формы, нарушение целостности образца (разрыва, сколы поверхности и т.п.) повреждением не являются.

7. Содержание отчета

Обработка результатов.

Длину распространения пламени определяют как среднее арифметическое значение по длине поврежденной части пяти образцов.

Величину КППТП устанавливают на основании результатов измерения длины распространения пламени (10.1) по графику распределения ППТП по поверхности образца, полученному при калибровке установки.

При отсутствии воспламенения образцов или длине распространения пламени менее 100 мм следует считать, что КППТП материала составляет более 11 кВт/кв.м.

В случае принудительного гашения образца по истечении 30 мин испытания величину ППТП определяют по результатам измерения длины распространения пламени на момент гашения и условно принимают эту величину равной критической.

Для материалов с анизотропными свойствами при классификации используют наименьшую из полученных величин КППТП.

В протоколе испытания приводят следующие данные:

- наименование испытательной лаборатории;
- наименование заказчика;
- наименование изготовителя (поставщика) материала;
- описание материала или изделия, техническую документацию, а также торговую марку, состав, толщину, плотность, массу и способ изготовления образцов, характеристику экспонируемой поверхности, для слоистых материалов - толщину каждого слоя и характеристику материала каждого слоя;
- параметры распространения пламени (длина распространения пламени, КППТП), а также время воспламенения образца;
- вывод о группе распространения материала с указанием величины КППТП;
- дополнительные наблюдения при испытании образца: выгорание, обугливание, плавление, вспучивание, усадка, расслоение, растрескивание, а также другие особые наблюдения при распространении пламени.

8. Контрольные вопросы

1. Что такое время воспламенения?
2. Что такое распространение пламени?
3. Что такое длина распространения пламени?
4. Что такое экспонируемая поверхность?
5. Что такое поверхностная плотность теплового потока?
6. Что такое критическая поверхностная плотность теплового потока?
7. В чем заключается сущность рассматриваемого в работе метода?
8. Перечислите группы распространения пламени.
9. Опишите образцы и установку для испытания.
10. Опишите порядок проведения калибровки.
11. Опишите порядок проведения испытания.
12. Обработка результатов и составление протокола. Опишите процедуру.

ГОСТ 51032-97 Материалы строительные. Метод испытания на распространение пламени.

9. Список литературы, рекомендуемый к использованию по данной теме

Основная литература

1. Кукин, П. П. Теория горения и взрыва : учебное пособие / П. П. Кукин, В. В. Юшин, С. Г. Емельянов ; Юго-Западный гос. ун-т, Рос. гос. технолог. ун-т им. К. Э. Циолковского (МАТИ-РГТУ). – М. : Юрайт, 2015. – 435 с. : ил., табл. – (Бакалавр). – Гриф: Доп. УМО. – Библиогр.: с. 433-435. – ISBN 978-5-9916-2722-1
2. Теория горения и взрывов [Электронный ресурс] : практикум / . — Электрон. текстовые данные. — Новосибирск: Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики, 2015. — 97 с. — 2227-8397. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/55503.html>

Дополнительная литература

1. Девисилов, В. А. Теория горения и взрыва : практикум : учеб. пособие для вузов / В.А. Девисилов, Т.И. Дроздова, С.С. Тимофеева. – Москва : ФОРУМ, 2012. – 351 с. : ил. ; 22. – (Высшее образование). – Гриф: Рек. УМО. – Библиогр.: с. 286-287. – ISBN 978-5-91134-555-6
2. Горев В.А. Теория горения и взрыва [Электронный ресурс] : учебное пособие / В.А. Горев. — Электрон. текстовые данные. — М. : Московский государственный строительный университет, ЭБС АСВ, 2010. — 200 с. — 2227-8397. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/16330.html>
3. Матерова С.И. Химия процессов горения [Электронный ресурс] : учебное пособие / С.И. Матерова. — Электрон. текстовые данные. — Железногорск: Сибирская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, 2017. — 63 с. — 2227-8397. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/66930.html>

Лабораторная работа № 16

Экспериментальное определение коэффициента дымообразования твердых веществ и материалов

1. Цель работы

Цель работы: экспериментальное определение коэффициента дымообразования твердых веществ и материалов.

2. Формируемые компетенции или их части

Способен определять круг задач в рамках поставленной цели и выбирать оптимальные способы их решения, исходя из действующих правовых норм, имеющихся ресурсов и ограничений (УК-2); способен учитывать современные тенденции развития техники и технологий в области техносферной безопасности, измерительной и вычислительной техники, информационных технологий при решении типовых задач в области профессиональной деятельности, связанной с защитой окружающей среды и обеспечением безопасности человека (ОПК-1).

3. Теоретическая часть

Коэффициент дымообразования – показатель, характеризующий оптическую плотность дыма, образующегося при пламенном горении или термоокислительной деструкции (тлении) определенного количества твердого вещества (материала) в условиях специальных испытаний.

Значение коэффициента дымообразования следует применять для классификации материалов по дымообразующей способности. Различают три группы материалов:

с малой дымообразующей способностью – коэффициент дымообразования до $50 \text{ м}^2 \cdot \text{кг}^{-1}$ включ.;

с умеренной дымообразующей способностью – коэффициент дымообразования св. 50 до $500 \text{ м}^2 \cdot \text{кг}^{-1}$ включ.;

с высокой дымообразующей способностью – коэффициент дымообразования св. $500 \text{ м}^2 \cdot \text{кг}^{-1}$.

Значение коэффициента дымообразования необходимо включать в стандарты или технические условия на твердые вещества и материалы.

Сущность метода определения коэффициента дымообразования заключается в определении оптической плотности дыма, образующегося при горении или тлении

известного количества испытуемого вещества или материала, распределенного в заданном объеме.

4. Оборудование и материалы

Установка для определения коэффициента дымообразования (чертеж 16.1) включает в себя следующие элементы.

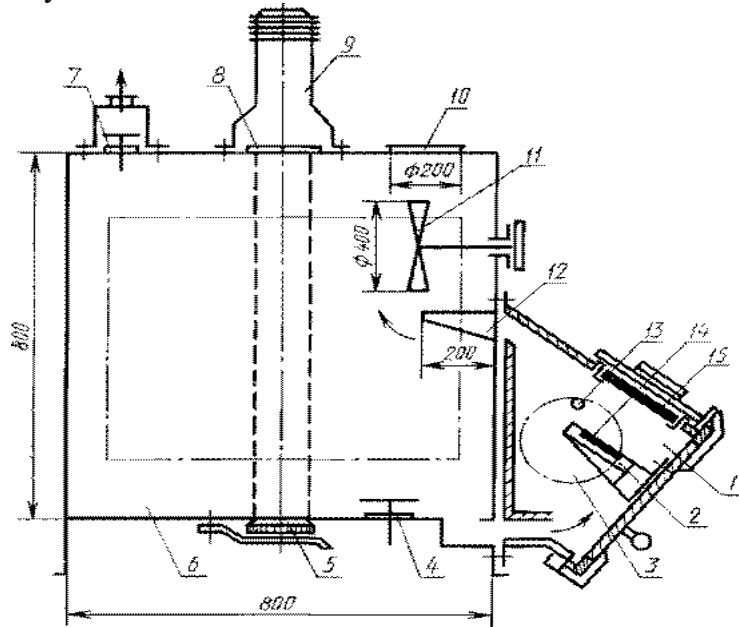


Рисунок 16.1 – Установка для определения коэффициента дымообразования

1 – камера сгорания; 2 – держатель образца; 3 – окно из кварцевого стекла; 4, 7 – клапаны продувки; 5 – приемник света; 6 – камера измерений; 8 – кварцевое стекло; 9 – источник света; 10 – предохранительная мембрана; 11 – вентилятор; 12 – направляющий козырек; 13 – запальная горелка; 14 – вкладыш; 15 – электронагревательная панель

Камера сгорания вместимостью $3 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$, выполненная из нержавеющей стали. Внутренняя поверхность камеры теплоизолирована асбосилитовыми плитами толщиной 20 мм и покрыта алюминиевой фольгой толщиной 0,2 мм. В камере сгорания установлены электронагревательная панель и держатель образца. Электронагревательную панель размерами (120x120) мм монтируют на верхней стенке камеры под углом 45° к горизонтали. Электроспираль панели изготавливается из проволоки марки Х20Н80-Н (ГОСТ 12766.1) диаметром 0,8 – 1,0 мм.

Держатель образца размерами (100x100x20) мм крепят на дверце камеры сгорания. В держателе установлен вкладыш из асбосилита размерами (92x92x20) мм, в центре которого имеется углубление для размещения лодочки с образцом (углубление во вкладыше должно быть таким, чтобы нагреваемая поверхность образца находилась на расстоянии 60 мм, от электронагревательной панели).

Над держателем образца установлена запальная газовая горелка, представляющая собой трубку из нержавеющей стали внутренним диаметром 1,5 – 2,0 мм.

В камере сгорания имеются верхнее и нижнее отверстия сечением (30x160) мм, соединяющие ее с камерой измерений.

Камера измерений размерами (800x800x800) мм, изготовленная из нержавеющей стали, имеет в верхней стенке отверстия для возвратного клапана продувки, источника света и предохранительной мембраны. На боковой стенке камеры установлен вентилятор с частотой вращения 5 с^{-1} . На передней стенке камеры имеется дверца с уплотнением из

мягкой резины по периметру. В днище камеры должны быть отверстия для приемника света и возвратного клапана продувки.

Фотометрическая система, состоящая из источника и приемника света. Источник света (гелий-неоновый лазер мощностью 2 – 5 мВт) крепят на верхней стенке камеры измерений, приемник света (фотодиод) расположен в днище камеры. Между источником света и камерой измерений устанавливают защитное кварцевое стекло, нагреваемое электроспиралью до температуры 120 – 140 °С.

Фотометрическая система должна обеспечивать измерение светового потока в рабочем диапазоне светопропускания от 2 до 90 % с погрешностью не более 10 %.

Подготовка образцов

Для испытаний готовят 10 – 15 образцов исследуемого материала размером (40х40) мм и фактической толщиной, но не более 10 мм (для образцов пенопластов допускается толщина до 15 мм). Лакокрасочные и пленочные покрытия испытывают нанесенными на ту же основу, которая принята в реальной конструкции. Если область применения лаков и красок неизвестна, то их испытывают нанесенными на алюминиевую фольгу толщиной 0,2 мм.

Подготовленные образцы перед испытаниями выдерживают при температуре (20±2) °С не менее 48 ч, затем взвешивают с погрешностью не более 0,01 г. Образцы должны характеризовать средние свойства исследуемого материала.

Проверку режимов работы установки проводят с помощью стандартного образца (рисунок 16.2). При этом значения коэффициента дымообразования (D_m) должно быть в пределах:

режим тления (без инициирующего пламени) $D_m = (360 \pm 20) \text{ м}^2 \cdot \text{кг}^{-1}$;

режим горения (с инициирующим пламенем) $D_m = (120 \pm 8) \text{ м}^2 \cdot \text{кг}^{-1}$.

Описание стандартного образца к методу определения коэффициента дымообразования

Проверку режимов работы установки, применяемой для определения коэффициента дымообразования, осуществляют с помощью стандартного образца, (чертеж 16.2), включающего в себя лодочку из листовой нержавеющей стали толщиной 1 мм, в центре которой закреплена цилиндрическая емкость внутренним диаметром 15 мм, высотой 8 мм и толщиной стенки 2 мм. Емкость наполнена смесью дибутилфталата и дисперсного кварцевого песка (размолотого кварцевого стекла).

Перед приготовлением стандартного образца лодочку прокалывают при температуре 750 – 800 °С не менее 5 мин. После охлаждения лодочки до комнатной температуры ее очищают от сажи и промывают спиртом. С помощью дозирующего устройства (например, медицинского шприца) в чистую сухую цилиндрическую емкость лодочки наливают определенное количество дибутилфталата а затем туда же насыпают (10,0±0,1) г кварцевого песка. Количество дибутилфталата для режима тления (0,10±0,01) г, для режима горения – (0,20±0,01) г

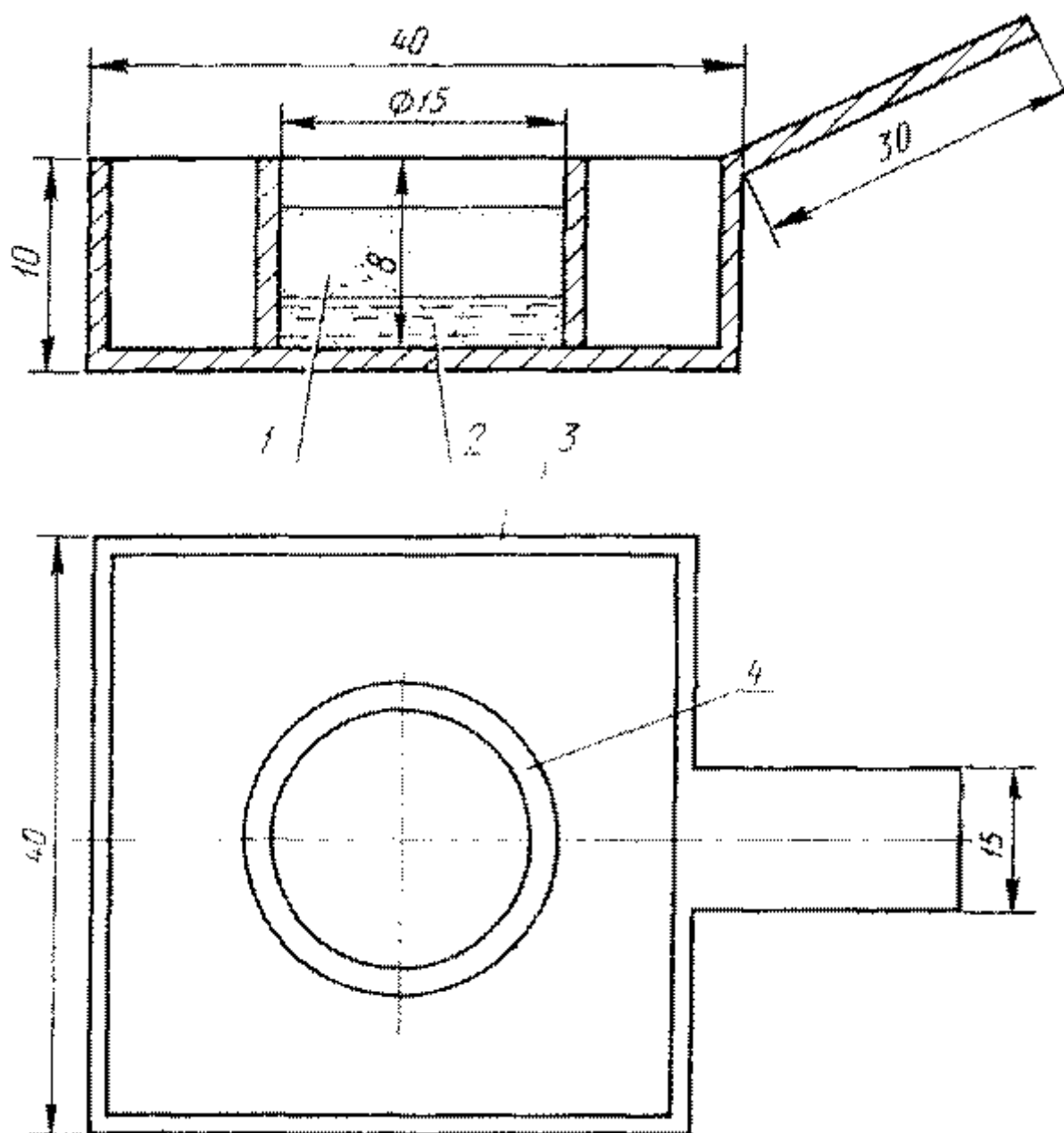


Рисунок 16.2 – Стандартный образец

1 – песок; 2 – жидкость; 3 – лодочка; 4 – цилиндрическая емкость

5. Указания по технике безопасности

1. При работе в лаборатории необходимо быть внимательным и соблюдать исключительную осторожность. Недостаточное знакомство с приборами и свойствами веществ, неаккуратность и отступление от правил техники безопасности и порядка проведения работы могут повлечь за собой тяжелые последствия.

Приступать к выполнению лабораторной работы разрешается только после инструктажа и соответствующей записи в журнале.

Слушатель обязан: строго соблюдать порядок выполнения работы, убрать с рабочего места все посторонние предметы, выяснить у преподавателя все возникающие в процессе работы вопросы.

2. Во избежание случайных отравлений запрещается пользоваться для питья лабораторной посудой.

3. Запрещается набирать пипеткой при помощи рта испытуемые жидкости; для этого следует пользоваться резиновой грушей.

4. Категорически запрещается сливать в канализацию огнеопасные жидкости, засорять грязью, твердыми предметами (бумага, древесина, битое стекло) раковины канализации.

5. В лаборатории категорически запрещается:

а) мыть оборудование, пол, столы бензином, керосином и другими легковоспламеняющимися и горючими жидкостями;

б) хранить тряпки, другие предметы, смоченные легковоспламеняющимися жидкостями.

6. Строго воспрещается проводить вблизи огня какие-либо работы, кроме предусмотренных описанием.

7. При пользовании газовыми горелками следует соблюдать следующие правила:

чтобы зажечь горелку надо немного открыть кран, выждать 2-3 с и затем к выходному отверстию поднести пламя спички или электрозажигалки. Если от неправильного зажигания горелки пламя «проскакивает», т.е. горит внутри горелки, ее следует немедленно погасить, дать ей остыть и только после этого зажечь снова.

8. Действующие электронагревательные приборы нельзя оставлять без присмотра.

9. Все работы с легковоспламеняющимися и горючими жидкостями должны проводиться в вытяжном шкафу или под вытяжным зонтом при работающей вентиляции.

10. Категорически запрещается нагревать на открытом огне сосуды, содержащие низкокипящие огнеопасные жидкости.

11. При нагревании ЛВЖ в количестве более 0,5 л необходимо под прибор ставить кювету достаточной емкости для предотвращения разлива жидкости в случае аварии.

12. В случае внезапного прекращения подачи воды на охлаждение приборов с ЛВЖ и ГЖ горелки должны быть потушены, а электрический ток выключен.

13. После окончания работы необходимо проверить:

а) закрыты ли газовые и водяные краны;

б) потушены ли горелки и другие огневые приборы, выключены ли электронагревательные приборы;

в) закрыты ли пробками бутылки и банки с реактивами и другими жидкостями и материалами.

14. Необходимо ознакомиться с местом нахождения в лаборатории огнетушителя, ящика с песком, асбестополотна и др.

15. В качестве первоочередной помощи при тепловом ожоге обожженное место необходимо смочить раствором перманганата калия, затем смазать мазью от ожогов, вазелином или раствором пищевой соды (бикарбонатом натрия) и перевязать бинтом.

Установку для определения коэффициента дымообразования необходимо помещать в вытяжной шкаф. Рабочее место оператора должно удовлетворять требованиям электробезопасности по ГОСТ 12.1.019 и санитарно-гигиеническим требованиям по ГОСТ 12.1.005.

6. Задания

1. Экспериментальная часть.

Испытание образцов проводят в двух режимах: в режиме тления и в режиме горения с использованием газовой горелки (длина пламени горелки 10 – 15 мм).

Включают электропитание установки в таком режиме, чтобы плотность теплового потока, падающего на образец, составляла $35 \text{ кВт} \cdot \text{м}^{-2}$. Контролируют плотность падающего теплового потока с помощью теплоприемника типа Гордона с погрешностью не более 8 %.

Включают источник и приемник света. Устанавливают начальное значение светопропускания, соответствующее верхнему пределу измерений регистрирующего прибора и принимаемому за 100%.

Подготовленный образец помещают в лодочку из нержавеющей стали. Открывают дверцу камеры сгорания и без задержки устанавливают лодочку с образцом в держатель, после чего дверцу закрывают.

Испытание прекращают при достижении минимального значения светопропускания.

В случае, когда минимальное значение светопропускания выходит за пределы рабочего диапазона или находится вблизи его границ, допускается уменьшать длину пути луча света (расстояние между источником и приемником света) либо изменять размеры образца.

При испытаниях в режиме тления образцы не должны самовоспламеняться. В случае самовоспламенения образца последующие испытания проводят при уменьшенном на $5 \text{ кВт} \cdot \text{м}^{-2}$ значении плотности теплового потока. Плотность теплового потока снижают до тех пор, пока не прекратится самовоспламенение образца во время испытания.

По окончании испытания лодочку с остатками образца вынимают из камеры сгорания. Установку вентилируют в течение 3 – 5 мин, но не менее, чем требуется для достижения исходного значения светопропускания в камере измерений.

Примечание. В случае, когда не достигается начальное значение светопропускания, защитные стекла фотометрической системы протирают тампоном из мягкой ткани, слегка смоченным этиловым спиртом.

В каждом режиме испытывают по пять образцов.

7. Содержание отчета

Обработка результатов.

1. Коэффициент дымообразования (D_m) в $\text{м}^2 \cdot \text{кг}^{-1}$ вычисляют по формуле:

$$D_m = \frac{V}{L_m} \ln \frac{T_0}{T_{min}}$$

где V – вместимость камеры измерения, м^3 ;

L – длина пути луча света в задымленной среде, м;

m – масса образца, кг;

T_0, T_{min} – соответственно значения начального и конечного светопропускания, %.

2. Для каждого режима испытаний. определяют коэффициент дымообразования как среднее арифметическое по результатам пяти испытаний.

За коэффициент дымообразования исследуемого материала принимают большее значение коэффициента дымообразования, вычисленное для двух режимов испытания.

3. Сходимость и воспроизводимость метода при доверительной вероятности 95 % не должна превышать 15 %.

4. Условия и результаты испытаний регистрируют в протоколе.

ПРОТОКОЛ**определения коэффициента дымообразования**

Дата _____	Наименование, состав и физико-химические свойства исследуемого вещества или указание НТД на материал _____
Условия в помещении:	
температура, °C _____	
атмосферное давление, кПа _____	
относительная влажность, % _____	

Размеры и внешние признаки испытываемых образцов

Режим испытаний	Номер образца для испытаний	Масса образца, кг	Светопропускание, %	Коэффициент дымообразования для каждого образца, м ² ·кг ⁻¹
начальное	конечное			

Примечание _____

Вывод _____

Фамилия оператора _____

Наименование лаборатории _____

8. Контрольные вопросы

1. Что такое «коэффициент дымообразования»?
2. Перечислите группы материалов по дымообразующей способности и охарактеризуйте их по значениям.
3. В чем заключается сущность метода определения коэффициента дымообразования?
4. Опишите оборудование и материалы, применяемые для испытания.
5. Расскажите процедуру описания стандартного образца к методу определения коэффициента дымообразования.
6. Опишите порядок проведения испытания.
7. Обработка результатов и составление протокола. Опишите процедуру.

9. Список литературы, рекомендуемый к использованию по данной теме

Основная литература

1. Кукин, П. П. Теория горения и взрыва : учебное пособие / П. П. Кукин, В. В. Юшин, С. Г. Емельянов ; Юго-Западный гос. ун-т, Рос. гос. технолог. ун-т им. К. Э. Циолковского (МАТИ-РГТУ). – М. : Юрайт, 2015. – 435 с. : ил., табл. – (Бакалавр). – Гриф: Доп. УМО. – Библиогр.: с. 433-435. – ISBN 978-5-9916-2722-1
2. Теория горения и взрывов [Электронный ресурс] : практикум / . — Электрон. текстовые данные. — Новосибирск: Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики, 2015. — 97 с. — 2227-8397. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/55503.html>

Дополнительная литература

1. Девисилов, В. А. Теория горения и взрыва : практикум : учеб. пособие для вузов / В.А. Девисилов, Т.И. Дроздова, С.С. Тимофеева. – Москва : ФОРУМ, 2012. – 351 с. : ил. ; 22. – (Высшее образование). – Гриф: Рек. УМО. – Библиогр.: с. 286-287. – ISBN 978-5-91134-555-6
2. Горев В.А. Теория горения и взрыва [Электронный ресурс] : учебное пособие / В.А. Горев. — Электрон. текстовые данные. — М. : Московский государственный строительный университет, ЭБС АСВ, 2010. — 200 с. — 2227-8397. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/16330.html>
3. Матерова С.И. Химия процессов горения [Электронный ресурс] : учебное пособие / С.И. Матерова. — Электрон. текстовые данные. — Железногорск: Сибирская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, 2017. — 63 с. — 2227-8397. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/66930.html>

Лабораторная работа № 17

Экспериментальное определение показателя токсичности продуктов горения полимерных материалов

1. Цель работы

Цель работы: экспериментальное определение показателя токсичности продуктов горения полимерных материалов.

2. Формируемые компетенции или их части

Способен определять круг задач в рамках поставленной цели и выбирать оптимальные способы их решения, исходя из действующих правовых норм, имеющихся ресурсов и ограничений (УК-2); способен учитывать современные тенденции развития техники и технологий в области техносферной безопасности, измерительной и вычислительной техники, информационных технологий при решении типовых задач в области профессиональной деятельности, связанной с защитой окружающей среды и обеспечением безопасности человека (ОПК-1).

3. Теоретическая часть

Токсичность – степень проявления вредного действия разнообразных химических соединений и их смесей.

Показатель токсичности продуктов горения – отношение количества материала к единице объема замкнутого пространства, в котором образующиеся при горении материала газообразные продукты вызывают гибель 50 % подопытных животных.

Значение показателя токсичности продуктов горения следует применять для сравнительной оценки полимерных материалов, а также включать в технические условия и стандарты на отделочные и теплоизоляционные материалы.

Классификация материалов по значению показателя токсичности продуктов горения приведена в таблице.

Класс опасности	H_{CT50} , г·м ⁻³ , при времени экспозиции, мин			
Чрезвычайно опасные	До 25	До 17	До 13	До 10
Высоко опасные	25-70	17-50	13-40	10-30
Умеренно опасные	70-210	50-150	40-120	30-90
Малоопасные	Св. 210	Св. 150	Св. 120	Св. 90

Сущность метода определения показателя токсичности заключается в сжигании исследуемого материала в камере сгорания при заданной плотности теплового потока и выявлении зависимости летального эффекта газообразных продуктов горения от массы материала, отнесенной к единице объема экспозиционной камеры.

4. Оборудование и материалы

Установка для определения показателя токсичности (рисунок 17.1) включает в себя следующие элементы.

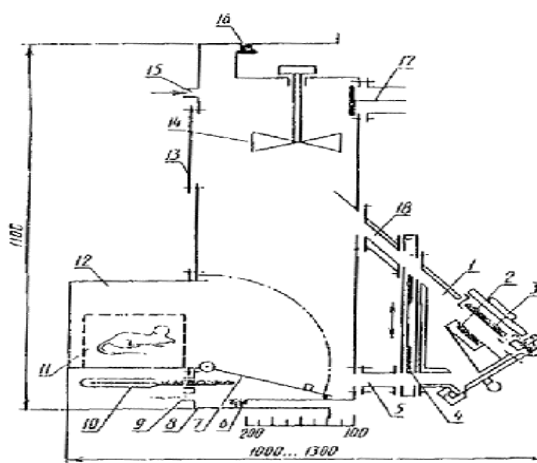


Рисунок 17.1 – Установка

1 – камера сгорания; 2 – держатель образца; 3 – элелектронагревательный излучатель; 4 – заслонки; 5, 18 – переходные рукава; 6 – стационарная секция экспозиционной камеры; 7 – дверца предкамеры; 8 – подвижная секция экспозиционной камеры; 9, 15 – штуцеры; 10 – термометр; 11 – клетка для подопытных животных; 12 – предкамера; 13 – предохранительная мембрана; 14 – вентилятор; 16 – резиновая прокладка; 17 – клапан продувки.

Камера сгорания вместимостью $3 \cdot 10^{-3}$ м³, соединенная с экспозиционной камерой переходными рукавами, выполнена из листовой нержавеющей стали толщиной $(2,0 \pm 0,1)$ мм. Внутренняя поверхность, камеры сгорания изолирована асбоцементными плитами толщиной 20 мм. В камере установлен экранированный электронагревательный излучатель размерами (120x120) мм и держатель образца размерами (120x120x25) мм. Излучатель представляет собой нагревательную спираль, размещенную в трубках из

кварцевого стекла и расположенную перед стальным полированным отражателем с водяным охлаждением. Он закреплен на верхней стенке камеры под углом 45° к горизонтали. Спираль излучателя сопротивлением $(22,0 \pm 0,1)$ Ом изготовлена из проволоки марки Х20Н80-Н (ГОСТ 12766.1) диаметром $(0,9 \pm 0,1)$ мм. Электропитание излучателя регулируют с помощью трансформатора и контролируют по показаниям вольтметра с погрешностью не более 0,5 В.

Держатель образца выполнен в виде металлической рамки, в которой закреплен асбоцементный поддон. Поддон имеет углубление для размещения вкладыша с образцом материала. Нагреваемая поверхность образца и поверхность электронагревательного излучателя параллельны, расстояние между ними равно 60 мм.

На боковой стенке камеры сгорания имеется окно из кварцевого стекла для наблюдения за образцом при испытаниях.

На выходе из камеры сгорания размещены заслонки верхнего и нижнего переходных рукавов. Длина верхнего рукава 250 мм, нижнего – 180 мм, проходные сечения рукавов соответственно (160×40) мм и (160×30) мм. Внутренняя поверхность верхнего переходного рукава также облицована асбоцементными плитами.

Экспозиционная камера, состоящая из стационарной и подвижной секций. По периметру стационарной секции имеется паз для надувной резиновой прокладки с рабочим давлением не менее 6 МПа. В верхней части камеры находится четырехлопастный вентилятор перемешивания диаметром 150 мм с частотой вращения 5 с^{-1} . На боковой стенке установлен клапан продувки. На торцевой стенке подвижной секции закреплены предохранительная мембрана, предкамера, штуцеры для подключения газоанализаторов, термометр для измерения температуры в нижней части камеры. Перемещение подвижной секции позволяет изменять объем экспозиционной камеры от 0,1 до 0,2 м³.

Предкамера объемом 0,015 м³, оборудованная наружной и внутренней дверцами и смотровым окном.

Водоохлаждаемый датчик типа Гордона ФОА-013 и регистрирующий прибор типа А 565-001-06 с диапазоном измерений от 0 до 100 мВ для контроля плотности теплового потока. Погрешность измерения плотности теплового потока не должна быть более $\pm 8 \%$.

Для непрерывного контроля состава газовой среды в экспозиционной камере используют газоанализаторы оксида углерода (ГИАМ-5М с диапазоном измерений от 0 до 1 %, допустимой погрешностью $\pm 2\%$), диоксида углерода (ГИАМ-5М с диапазоном измерений от 0 до 5 %, допустимой погрешностью $\pm 2 \%$) и кислорода (МН 5130-1 с диапазоном измерений от 0 до 21 %, допустимой погрешностью $\pm 2 \%$).

Термометр лабораторный любого типа с диапазоном измерений от 0 до 100 °С, с погрешностью не более 1 °С.

5. Указания по технике безопасности

1. При работе в лаборатории необходимо быть внимательным и соблюдать исключительную осторожность. Недостаточное знакомство с приборами и свойствами веществ, неаккуратность и отступление от правил техники безопасности и порядка проведения работы могут повлечь за собой тяжелые последствия.

Приступать к выполнению лабораторной работы разрешается только после инструктажа и соответствующей записи в журнале.

Слушатель обязан: строго соблюдать порядок выполнения работы, убрать с рабочего места все посторонние предметы, выяснить у преподавателя все возникающие в процессе работы вопросы.

2. Во избежание случайных отравлений запрещается пользоваться для питья лабораторной посудой.

3. Запрещается набирать пипеткой при помощи рта испытуемые жидкости; для этого следует пользоваться резиновой грушей.

4. Категорически запрещается сливать в канализацию огнеопасные жидкости, засорять грязью, твердыми предметами (бумага, древесина, битое стекло) раковины канализации.

5. В лаборатории категорически запрещается:

а) мыть оборудование, пол, столы бензином, керосином и другими легковоспламеняющимися и горючими жидкостями;

б) хранить тряпки, другие предметы, смоченные легковоспламеняющимися жидкостями.

6. Строго воспрещается проводить вблизи огня какие-либо работы, кроме предусмотренных описанием.

7. При пользовании газовыми горелками следует соблюдать следующие правила:

чтобы зажечь горелку надо немного открыть кран, выждать 2-3 с и затем к выходному отверстию поднести пламя спички или электрозажигалки. Если от неправильного зажигания горелки пламя «проскакивает», т.е. горит внутри горелки, ее следует немедленно погасить, дать ей остыть и только после этого зажечь снова.

8. Действующие электронагревательные приборы нельзя оставлять без присмотра.

9. Все работы с легковоспламеняющимися и горючими жидкостями должны проводиться в вытяжном шкафу или под вытяжным зонтом при работающей вентиляции.

10. Категорически запрещается нагревать на открытом огне сосуды, содержащие низкокипящие огнеопасные жидкости.

11. При нагревании ЛВЖ в количестве более 0,5 л необходимо под прибор ставить кювету достаточной емкости для предотвращения разлива жидкости в случае аварии.

12. В случае внезапного прекращения подачи воды на охлаждение приборов с ЛВЖ и ГЖ горелки должны быть потушены, а электрический ток выключен.

13. После окончания работы необходимо проверить:

а) закрыты ли газовые и водяные краны;

б) потушены ли горелки и другие огневые приборы, выключены ли электронагревательные приборы;

в) закрыты ли пробками бутылки и банки с реактивами и другими жидкостями и материалами.

14. Необходимо ознакомиться с местом нахождения в лаборатории огнетушителя, ящика с песком, асбестополотна и др.

15. В качестве первоочередной помощи при тепловом ожоге обожженное место необходимо смочить раствором перманганата калия, затем смазать мазью от ожогов, вазелином или раствором пищевой соды (бикарбонатом натрия) и перевязать бинтом.

Помещение, в котором проводят испытания по определению токсичности продуктов горения, должно быть оборудовано приточно-вытяжной вентиляцией. Рабочее место оператора должно удовлетворять требованиям электробезопасности по ГОСТ 12.1.019 и санитарно-гигиеническим требованиям по ГОСТ 12.1.005.

6. Задания

1. Экспериментальная часть.

1.1 Подготовка к испытанию

1. При наладке установки следует определить параметры напряжения на спирали электронагревательного излучателя, при которых обеспечиваются заданные уровни плотности теплового потока. Для измерения величины падающего теплового потока водоохлаждаемый датчик ФОА-013 закрепляют на нейтральном участке держателя образца. Измерения проводят при герметизированной экспозиционной камере и открытых

заслонках переходных рукавов. По результатам измерений строят график зависимости плотности падающего теплового потока (Q) от напряжения на спирали электронагревательного излучателя.

2. По величине плотности теплового потока определяют значение температуры испытания (t_{ucn}), соответствующее температуре нагреваемой поверхности контрольного (негорючего) образца из асбоцемента. Для определения (t_{ucn}) используют данные, приведенные в табл. 17.1.

Таблица 17.1 – Данные для определения t_{ucn}

Q , кВт·м ⁻²	10,0	13,5	18,0	23,0	28,0	32,5	38,0	44,0	52,5	65,02
t_{ucn} , °C	300	350	400	450	500	550	600	650	700	750

3. Установку следует считать готовой к испытаниям материалов, если при контрольной проверке:

значения плотности падающего теплового потока соответствуют установленным значениям напряжения на спирали электронагревательного излучателя;

выход СО в условиях термоокислительного разложения порошковой целлюлозы (фракция 0,25-0,75) массой 2,5 г при температуре испытания 450 °C (плотность падающего теплового потока 23 кВт·м⁻²) составляет (200±4) мг·г⁻¹;

концентрация СО в экспозиционной камере за время выдерживания 30 мин снижается не более чем на 5 % от первоначального уровня.

4. Для испытаний готовят не менее 10 образцов размером (40х40) мм фактической толщины, но не более 10 мм. Образцы кондиционируют в лабораторных условиях не менее 48 ч и затем взвешивают с погрешностью не более 0,1 г. Они должны характеризовать средние свойства исследуемого материала.

5. Предварительно образцы каждого материала подвергают воздействию тепловых потоков различной плотности, обеспечивающих в каждом последующем опыте повышение температуры испытания образца на 50 °C. При этом находят значение температуры испытания материала в режиме термоокислительного разложения (тления). Оно должно быть на 50 °C ниже температуры, при которой наблюдается самовоспламенение образца.

1.2 Проведение испытания

1. Материалы испытывают в одном из двух режимов - термоокислительного разложения или пламенного горения, а именно в режиме, способствующем выделению более токсичных смесей летучих веществ. Режим пламенного горения обеспечивается при температуре испытания 750°C (плотность падающего теплового потока 65 кВт·м⁻²). Критерием выбора режима основных испытаний служит наибольшее число летальных исходов в сравниваемых группах подопытных животных.

2. При проведении основных испытаний в установленном режиме находят ряд значений зависимости токсического действия продуктов горения от величины отношения массы образца к объему установки. Для получения токсических эффектов ниже и выше уровня 50 % летальности изменяют объем экспозиционной камеры при постоянных размерах образцов материалов.

Примечание - При определении токсического эффекта учитывают гибель животных, наступившую во время экспозиции, а также в течение последующих 14 суток.

3. Затравку животных проводят статическим способом. В каждом опыте используют не менее 8 белых мышей массой (20±2) г. Продолжительность экспозиции

составляет 30 мин. Температура воздуха в предкамере за время экспозиции не должна превышать 30 °С, а концентрация кислорода должна быть менее 16 % об.

Примечание - В отдельных случаях по требованию заказчика время экспозиции может быть изменено в пределах 5 - 60 мин.

4. Предусматривают следующий порядок проведения испытания. Нагнетают воздух в надувную прокладку до давления 0,6 МПа, проверяют заземление установки, исправность приборов и оборудования, эффективность вентиляции. Подают воду для охлаждения излучателя, после чего включают его на соответствующее напряжение. Заслонки переходных рукавов, клапан продувки, дверца камеры сгорания находятся в положении "закрыто".

Взвешенный образец материала помещают, а при необходимости закрепляют во вкладыше, имеющем комнатную температуру. Клетку с животными устанавливают в предкамере, наружную дверцу которой закрывают.

С момента выхода электронагревательного излучателя на стабилизированный режим (через 3 мин после включения) открывают заслонки переходных рукавов и дверцу камеры сгорания. Вкладыш с образцом без задержки помещают в держатель образца, после чего дверцу камеры сгорания быстро закрывают. Отмечают время начала экспозиции животных в токсический среде.

По достижении максимальных значений концентрации СО и СО₂ в экспозиционной камере заслонки переходных рукавов закрывают. Снимают напряжение с нагревательного элемента излучателя. Включают на 2 мин вентилятор перемешивания.

По истечении времени экспозиции животных открывают клапан продувки, заслонки переходных рукавов и наружную дверцу предкамеры. Установку вентилируют не менее 10 мин. Регистрируют число погибших и выживших животных.

Примечание - В случае определения показателя токсичности продуктов горения при условии кратковременной (5 - 20 мин) экспозиции затравку животных начинают с момента достижения максимальных значений концентрации СО и СО₂, но не позднее чем через 15 мин после разложения образца.

5. В зависимости от состава материала при анализе продуктов горения определяют количественный выход оксида углерода, диоксида углерода, цианистого водорода, оксидов азота, альдегидов и других веществ. Для оценки вклада оксида углерода в токсический эффект измеряют содержание карбоксигемоглобина в крови подопытных животных.

6. Если масса образца принятых размеров (40x40) мм не позволяет получить эффекты меньше или больше уровня летальности 50 %, допускается уменьшить размеры образца или увеличить их до (80x80) мм и толщину до 20мм.

7. Содержание отчета

Обработка результатов.

1. Полученный ряд значений зависимости летальности от относительной массы материала используют для расчета показателя токсичности $H_{CL_{50}}$ в г·м⁻³. Расчет проводят с помощью пробит-анализа или других способов расчета средних смертельных доз и концентраций.

2. При необходимости определить классификационные параметры для других значений времени экспозиции их вычисляют по формуле

$$\varphi = \left(\sum_{j=1}^{m_1} \varphi_j^2 + \sum_{j=1}^{m_2} \varphi_j^2 \right) / \left(\sum_{j=1}^{m_1} \varphi_j^2 + \sum_{j=1}^{m_2} \varphi_j^2 \right), \quad (17.1)$$

где CL_{50CO} – средняя смертельная концентрация оксида углерода в $\text{мг} \cdot \text{м}^{-3}$, которую вычисляют по уравнению $CL_{50} = 4502 + 2229 t^{-1}$ (t – время экспозиции в мин);

gCO = уровень выделения CO при сгорании условно “эталонных” материалов: для чрезвычайно опасных – больше $360 \text{ мг} \cdot \text{г}^{-1}$, высокоопасных $120\text{--}360 \text{ мг} \cdot \text{г}^{-1}$, умеренноопасных $40\text{--}120 \text{ мг} \cdot \text{г}^{-1}$, малоопасных – до $40 \text{ мг} \cdot \text{г}^{-1}$.

3. Если значение $H_{Cl_{21}}$, полученное в результате испытания материала, близко к граничному значению двух классов, то при определении степени опасности материала принимают во внимание режим испытания, время разложения образца, данные о составе продуктов горения, сведения о токсичности обнаруженных соединений.

4. При содержании карбоксигемоглобина в крови подопытных животных 50 % и более считают, что токсический эффект продуктов горения обуславливается в основном действием оксида углерода.

5 Сходимость метода при доверительной вероятности 95 % не должна превышать по выходу CO ($\text{мг} \cdot \text{г}^{-1}$) 15 %.

6. Воспроизводимость метода при доверительной вероятности 95 % не должна превышать по выходу CO ($\text{мг} \cdot \text{г}^{-1}$) 25 %

7. Условия и результаты испытаний регистрируют в протоколе.

ПРОТОКОЛ определения показатели токсичности продуктов горения полимерных материалов

Дата _____ Наименование, состав и указание НД на

Условия в помещении: материал _____

температура, °C _____

атмосферное давление, кПа _____

относительная влажность, % _____

Размеры и внешние признаки испытываемых образцов _____

Номер образца	Температура испытания, °C	Время разложения (горения) образца, мин	Потеря массы, г	Массовая доля летучих веществ, %	Продолжительность экспозиции животных, мин	Параметры токсичности	
						$H_{Cl_{21}}$, $\text{г} \cdot \text{ч} \cdot \text{м}^{-3}$	Массовая доля карбоксигемоглобина, %

Примечание _____

Вывод _____

Фамилия оператора _____

Наименование лаборатории _____

8. Контрольные вопросы

1. Что такое «токсичность»?
2. Что такое «показатель токсичности продуктов горения»?
3. Приведите классификацию материалов по значению показателя токсичности продуктов горения.
4. В чем заключается сущность метода определения показателя токсичности?
4. Опишите процедуру подготовки к испытанию.
6. Опишите порядок проведения испытания.
7. Обработка результатов и составление протокола. Опишите процедуру обработки результатов и структуру протокола.

9. Список литературы, рекомендуемый к использованию по данной теме

Основная литература

1. Кукин, П. П. Теория горения и взрыва : учебное пособие / П. П. Кукин, В. В. Юшин, С. Г. Емельянов ; Юго-Западный гос. ун-т, Рос. гос. технолог. ун-т им. К. Э. Циолковского (МАТИ-РГТУ). – М. : Юрайт, 2015. – 435 с. : ил., табл. – (Бакалавр). – Гриф: Доп. УМО. – Библиогр.: с. 433-435. – ISBN 978-5-9916-2722-1
2. Теория горения и взрывов [Электронный ресурс] : практикум / . — Электрон. текстовые данные. — Новосибирск: Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики, 2015. — 97 с. — 2227-8397. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/55503.html>

Дополнительная литература

1. Девисилов, В. А. Теория горения и взрыва : практикум : учеб. пособие для вузов / В.А. Девисилов, Т.И. Дроздова, С.С. Тимофеева. – Москва : ФОРУМ, 2012. – 351 с. : ил. ; 22. – (Высшее образование). – Гриф: Рек. УМО. – Библиогр.: с. 286-287. – ISBN 978-5-91134-555-6
2. Горев В.А. Теория горения и взрыва [Электронный ресурс] : учебное пособие / В.А. Горев. — Электрон. текстовые данные. — М. : Московский государственный строительный университет, ЭБС АСВ, 2010. — 200 с. — 2227-8397. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/16330.html>
3. Матерова С.И. Химия процессов горения [Электронный ресурс] : учебное пособие / С.И. Матерова. — Электрон. текстовые данные. — Железногорск: Сибирская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, 2017. — 63 с. — 2227-8397. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/66930.html>

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Методические указания

по организации самостоятельной работы студентов
по дисциплине «ТЕОРИЯ ГОРЕНИЯ И ВЗРЫВА»
для студентов направления подготовки
20.03.01 «Техносферная безопасность»
(направленность (профиль): «Пожарная безопасность»)

**Ставрополь
2026**

Введение

При изучении дисциплины «Теория горения и взрыва» учебным планом предусмотрены аудиторные занятия (лекции, практические и лабораторные занятия), а также самостоятельная работа студентов (СРС) по изучению основной и дополнительной литературы, выступления с сообщениями и докладами.

Основными формами работы и контроля СРС в данном курсе являются:

- самостоятельное изучение основного и дополнительного материала по темам, представленным в рабочей программе дисциплины. Отчет по данной форме контроля представляется в форме конспекта. Данное мероприятие сочетает письменную и устную формы деятельности студента; выявляет аналитические умения, навыки выделения смысловых центров текста.

В данных методических указаниях представлены рекомендации по организации самостоятельной работы.

Оглавление

Введение	91
Общая характеристика самостоятельной работы студента при изучении дисциплины	
«Теория горения и взрыва»	93
План-график выполнения самостоятельной работы	94
Контрольные точки и виды отчетности по ним	94
Методические рекомендации по изучению теоретического материала	96
Методические указания по подготовке к экзамену	100
Список рекомендуемой литературы	111

Общая характеристика самостоятельной работы студента при изучении дисциплины «Теория горения и взрыва»

При изучении курса предусмотрены следующие виды самостоятельной работы:

1. Самостоятельное изучение материала по темам дисциплины (в соответствии с рабочей программой);
2. Подготовка к практическим и лабораторным занятиям.

Самостоятельное изучение теоретического материала сочетает устную и письменную работу студента и организуется с целью формирования у студентов навыков поиска информации по определенной тематике, работы с текстовой информацией, выделения главного смыслового содержания текста и умения представить его краткое изложение в письменном виде, а также сформулировать теоретический ответ по рассматриваемому вопросу. Данный вид работы способствует формированию следующей компетенции:

- способен определять круг задач в рамках поставленной цели и выбирать оптимальные способы их решения, исходя из действующих правовых норм, имеющихся ресурсов и ограничений (УК-2);

- способен учитывать современные тенденции развития техники и технологий в области техносферной безопасности, измерительной и вычислительной техники, информационных технологий при решении типовых задач в области профессиональной деятельности, связанной с защитой окружающей среды и обеспечением безопасности человека (ОПК-1).

Подготовка к практическим и лабораторным занятиям проводится с целью формирования умений систематизации теоретических знаний для применения их практической деятельности. Формируемые компетенции:

- способен определять круг задач в рамках поставленной цели и выбирать оптимальные способы их решения, исходя из действующих правовых норм, имеющихся ресурсов и ограничений (УК-2);

- способен учитывать современные тенденции развития техники и технологий в области техносферной безопасности, измерительной и вычислительной техники, информационных технологий при решении типовых задач в области профессиональной деятельности, связанной с защитой окружающей среды и обеспечением безопасности человека (ОПК-1).

План-график выполнения самостоятельной работы

№	Вид самостоятельной работы	Форма контроля	Сроки исполнения
	3 семестр		
1.	Подготовка к практическим занятиям	Собеседование	еженедельно
2.	Подготовка к лабораторным работам	Собеседование	еженедельно
3.	Самостоятельное изучение литературы по теме 4: Химические процессы при горении.	Собеседование, проверка конспекта	2 неделя
4.	Самостоятельное изучение литературы по теме 6: Возникновение и развитие процессов горения.	Собеседование, проверка конспекта	3 неделя
5.	Самостоятельное изучение литературы по теме 8: Способы и условия прекращения горения.	Собеседование, тестирование	4 неделя
6.	Самостоятельное изучение литературы по теме 9: Характеристика горения газов.	Собеседование, проверка конспекта	5 неделя
	4 семестр		
7.	Подготовка к практическим занятиям	Собеседование	еженедельно
8.	Подготовка к лабораторным работам	Собеседование	еженедельно
9.	Самостоятельное изучение литературы по теме 14: Химические процессы, сопровождающие взрыв.	Собеседование	12-13 неделя
		Итого:	143.25 ч.

Контрольные точки и виды отчетности по ним

Не предусмотрены

Методические рекомендации по изучению теоретического материала

При изучении дисциплины «Теория горения и взрыва» учебным планом предусмотрены аудиторные занятия (лекции, лабораторные и практические), а также самостоятельная работа студентов (СРС) по изучению основной и дополнительной литературы.

Основными формами работы и контроля СРС в данном курсе являются:

- самостоятельное изучение основного и дополнительного материала по темам, представленным в рабочей программе дисциплины. Отчет по данной форме контроля представляется в форме конспекта. Данное мероприятие сочетает письменную и устную формы деятельности студента; выявляет аналитические умения, навыки выделения смысловых центров текста.

Оценка знаний с помощью собеседования

Проверка знаний материала лекционных и практических занятий проводится в виде собеседования. Предполагается, что отдельные вопросы тем дисциплины изучаются студентами самостоятельно. Знания указанных вопросов проверяется наличием конспектов и собеседованием. Ниже приведены вопросы для собеседования по темам курса «Теория горения и взрыва».

Данное оценочное мероприятия проводится на лабораторных и практических занятии на основании материалов и знаний, полученных на лекциях, а также при изучении основной и дополнительной литературы. Для подготовки к данному оценочному мероприятию студенту необходимо подготовить устные ответы на вопросы собеседования, либо законспектировать данные ответы в тетрадь. При подготовке к ответу студенту предоставляется право пользования материалами лекций, основной и дополнительной литературы, а также интернет-ресурсов.

При проверке задания, оцениваются:

- правильность ответов;
- чёткое знание терминологии;
- умение грамотно, четко и последовательно излагать материал;
- использование дополнительной литературы при подготовке;
- умение анализировать теоретический материал и сопоставлять его с практикой;
- знание статистических данных об изучаемых процессах и явлениях;
- умение приводить конкретные примеры.

В процессе самостоятельного изучения отдельных вопросов тем дисциплины рекомендуется работа с литературой, перечень которой приведен в конце методических указаний.

Тема 1. Основные явления при горении

1. Что такое «горение».
2. Цепная реакция при горении.
3. Перечислите стадии цепей при горении.
4. Что такое энергия активации?
5. Определение горения.
6. Механизм химических реакций при горении.
7. Влияние различных факторов на скорость химических реакций при горении.
8. Основные процессы, происходящие при горении.

Тема 2. Основные понятия теории горения

1. Что такое самовоспламенение?
2. Что такое зажигание?
3. Приведите классификацию процессов горения.
4. Что такое газы, жидкости, твердые вещества и пыли.

5. Дайте характеристику полного и неполного горения.
6. Гомогенное, гетерогенное и диффузное горение.
7. Турбулентное горение.
8. Особенности горения взрывчатых веществ.

Тема 3. Горение и условия его протекания

1. Влияние влажности воздуха на процессы горения.
2. Влияние давления на процессы горения.
3. Что приводит к самоускорению реакции горения.
4. Молекулярность горения.
5. Механизм самоускорения реакции горения.

Тема 4. Химические процессы при горении

1. Что относится к простым веществам.
2. Приведите уравнение горения водорода.
3. Приведите уравнение горения оксида углерода.
4. Основа горения углеводородов.
5. Цепные реакции. Горение простых веществ.
6. Химические процессы при горении водорода.
7. Химические процессы при горении оксида углерода.
8. Горение углеводородов. Горение углерода.

Тема 5. Возникновение и развитие процессов горения

1. Дайте определение понятиям самовоспламенение и самовозгорание.
2. Дайте определение понятию зажигание.
3. Что такое дефлаграционное и детонационное горение.
4. Самовоспламенение и самовозгорание
5. Зажигание.
6. Характеристики горения газов.
7. Распространение пламени по газам.
8. Дефлаграционное и детонационное горение.

Тема 6. Способы и условия прекращения горения

1. Условия потухания пламени.
2. Что такое флегматизация?
3. Перечислите вещества, относящиеся к флегматизаторам.
4. Что такое ингибирование?
5. Перечислите вещества, относящиеся к ингибиторам.
6. Условия потухания пламени.
7. Флегматизация.
8. Ингибирование.
9. Прекращение горения.

Тема 7. Характеристики горения жидкостей

1. Что необходимо для воспламенения жидкости?
2. Охарактеризуйте процесс образования концентрационных паров.
3. Какие внешние условия влияют на протекание процессов горения?
4. Механизм горения.
5. Прогрев жидкости при горении.
6. Влияние внешних условий на протекание процессов горения.

Тема 8. Характеристики горения аэрогелей и аэрозолей

1. Что такое аэрозоли?
2. Что такое аэрозоли?
3. Назовите виды гибридных смеси.
4. Перечислите показатели опасности аэрогелей.
5. Показатели пожаровзрывоопасности аэрозолей.
6. Факторы, влияющие на опасность аэрозолей.
7. Гибридные смеси.
8. Показатели опасности аэрогелей.

Тема 9. Химические процессы, сопровождающие взрыв

1. Назовите виды взрывчатых превращений.
2. Что такое детонация?
3. Как называется процесс перехода горения газопаровоздушных смесей во взрыв.
4. Формы взрывчатых превращений.
5. Основные положения теории детонации.
6. Переход горения газопаровоздушных смесей во взрыв.

Тема 10. Физический взрыв и условия его возникновения

1. Охарактеризуйте бризантное действие взрыва.
2. Охарактеризуйте фугасное действие взрыва.
3. Механическое действие взрыва в воздухе, воде, твердой среде.
4. Взрыв газопаровоздушных и пылевоздушных систем в закрытом помещении.
5. Взрыв газопаровоздушных и пылевоздушных систем в открытом пространстве.

Тема 11. Ударная волна и ее основные параметры

1. Что такое воздушная ударная волна?
2. Параметры давления во взрывной ударной волне.
3. Действие ВУВ на конструкции и сооружения.
4. Общие сведения о воздушных ударных волнах.
5. Параметры воздушной ударной волны и их характеристики.
6. Влияние характеристик ударной волны на живой организм.

Критерии оценивания компетенций

Оценка «отлично» выставляется студенту, если он опираясь на круг задач в рамках поставленной цели и выбирая оптимальные способы их решения, исходя из действующих правовых норм, имеющихся ресурсов и ограничений способен на высоком уровне разрабатывает план действий для решения задач проекта; опираясь на современные тенденции развития техники и технологий в области техносферной безопасности, измерительной и вычислительной техники, информационных технологий при решении типовых задач в области профессиональной деятельности, связанной с защитой окружающей среды и обеспечением безопасности человека способен на высоком уровне продемонстрировать знание базовых математических, естественнонаучных и инженерных принципов в области техносферной безопасности, анализировать и применять технологии выполнения наиболее типичных операций применительно к сфере своей деятельности

Оценка «хорошо» выставляется студенту, если он опираясь на круг задач в рамках поставленной цели и выбирая оптимальные способы их решения, исходя из действующих правовых норм, имеющихся ресурсов и ограничений способен на среднем уровне разрабатывает план действий для решения задач проекта; опираясь на современные тенденции развития техники и технологий в области техносферной безопасности,

измерительной и вычислительной техники, информационных технологий при решении типовых задач в области профессиональной деятельности, связанной с защитой окружающей среды и обеспечением безопасности человека способен на среднем уровне демонстрировать знание базовых математических, естественнонаучных и инженерных принципов в области техносферной безопасности, анализировать и применять технологии выполнения наиболее типичных операций применительно к сфере своей деятельности

Оценка «удовлетворительно» выставляется студенту, если он опираясь на круг задач в рамках поставленной цели и выбирая оптимальные способы их решения, исходя из действующих правовых норм, имеющихся ресурсов и ограничений способен на минимальном уровне разрабатывает план действий для решения задач проекта; опираясь на современные тенденции развития техники и технологий в области техносферной безопасности, измерительной и вычислительной техники, информационных технологий при решении типовых задач в области профессиональной деятельности, связанной с защитой окружающей среды и обеспечением безопасности человека способен на минимальном уровне демонстрировать знание базовых математических, естественнонаучных и инженерных принципов в области техносферной безопасности

Оценка «неудовлетворительно» выставляется студенту, если он не способен определять круг задач в рамках поставленной цели и выбирать оптимальные способы их решения, исходя из действующих правовых норм, имеющихся ресурсов и ограничений; не владеет современными тенденциями развития техники и технологий в области техносферной безопасности, измерительной и вычислительной техники, информационных технологий при решении типовых задач в области профессиональной деятельности, связанной с защитой окружающей среды и обеспечением безопасности человека

Методические указания по подготовке к экзамену

Процедура проведения экзамена осуществляется в соответствии с Положением о проведении текущего контроля успеваемости и промежуточной аттестации обучающихся по образовательным программам высшего образования в СКФУ.

В экзаменационный билет включаются 2 теоретических вопроса и 1 практическое задание. Вопросы и задания повышенного уровня основаны на навыках и умениях применения обучаемыми знаний базового уровня применительно к конкретным условиям или ситуациям. Они основываются на анализе базового материала.

Для подготовки по билету отводится 30 минут.

При подготовке к ответу у студента не необходимости пользоваться дополнительными материалами и техническими средствами.

При проверке практического задания, оцениваются:

- правильность и точность ответов;
- рациональность выполнения;
- анализ составленных схем;
- умение приводить конкретные примеры рассматриваемых ситуаций.

Вопросы (задача, задание) для проверки уровня обученности

- Знать
1. Основные явления при горении.
 2. Основные понятия теории горения.
 3. Химические процессы при горении.
 4. Возникновение процессов горения.
 5. Развитие горения.
 6. Способы и условия прекращения горения.
 7. Виды горения по агрегатному состоянию горючего и окислителя. Их характеристики.
 8. Виды пожаров по масштабам и интенсивности. Их характеристики.
 9. Возникновение процессов горения: зажигание.
 10. Диффузионное горение жидкостей: механизм горения, форма и размеры пламени.
 11. Диффузионное горение жидкостей: прогрев жидкости при горении, влияние диаметра сосуда на скорость выгорания, влияние концентрации кислорода на скорость выгорания.
 12. Зажигание.
 13. Ингибирование.
 14. Основные явления при горении. Горение в движущемся газе. Турбулентное горение.
 15. Самовозгорание: микробиологическое самовозгорание, модель процесса самовозгорания насыпи растительного материала.
 16. Самовозгорание: тепловое самовозгорание, химическое самовозгорание.
 17. Самовоспламенение. Стационарная теория.
 18. Условия потухания пламени.
 19. Условия, необходимые для горения и взрыва.
 20. Флегматизация газовых смесей.
 21. Флегматизация пылевоздушных смесей инертными разбавителями.
 22. Химические процессы при горении водорода.
 23. Химические процессы при горении: цепные реакции, зарождение цепей, продолжение цепей, обрыв цепей.
 24. Механизм химических реакций при горении.
 25. Влияние различных факторов на скорость химических реакций при

горении.

26. Гомогенное, гетерогенное и диффузное горение.
27. Турбулентное горение.
28. Молекулярность горения.
29. Механизм самоускорения реакции горения
30. Ингибирование.
31. Прекращение горения.
32. Процесс горения газов.
33. Нижний и верхний концентрационные пределы воспламенения.
34. Влияние давления и температуры смеси, влажности воздуха.
35. Содержание примесей, замедляющих реакции горения.
36. Распространение пламени по газам: дефлаграционное горение, детонация.
37. Режимы распространения пламени (горения). Их характеристики.
38. *Горение парогазовых смесей при повышенных температурах и давлениях.*
39. *Диффузионное горение жидкостей: механизм горения, форма и размеры пламени.*
40. *Диффузионное горение жидкостей: прогрев жидкости при горении, влияние диаметра сосуда на скорость выгорания, влияние концентрации кислорода на скорость выгорания.*
41. *Горение твердых материалов: механизм горения, процессы тления в пенопластах.*
42. *Условия потухания пламени.*
43. *Флегматизация газовых смесей.*
44. *Флегматизация пылевоздушных смесей инертными разбавителями.*
45. *Взрывы пылей.*
46. *Флегматизация пылевоздушных смесей инертными частицами.*
47. *Характеристики горения газов: температура самовоспламенения, энергия зажигания.*
48. *Характеристики горения газов: концентрационные пределы распространения пламени, нормальная скорость горения.*
49. *Характеристики горения газов: флегматизирующие концентрации инертных разбавителей, давление взрыва.*
50. *Характеристики горения жидкостей: температура вспышки, температура воспламенения.*
51. *Характеристики горения жидкостей: температура самовоспламенения, температурные пределы распространения пламени, скорость выгорания.*
52. *Показатели пожаровзрывоопасности аэрозолей.*
53. *Факторы, влияющие на опасность аэрозолей: дисперсный состав твердой фазы, теплота сгорания, температура и давление.*
54. *Факторы, влияющие на опасность аэрозолей: влагосодержание частиц и воздуха, состав твердой фазы аэрозоля, газообразные флегматизаторы.*
55. *Понятие о самоускоряющихся химических реакциях и критических явлениях. Особенности взрывной реакции.*
56. *Физический взрыв. Переход от теплового взрыва к физическому.*
57. *Инициирование физического взрыва.*
58. *Баланс энергии при взрыве и формы его работы.*
59. *Инициирование физического взрыва.*
60. *Баланс энергии при взрыве и формы его работы.*
61. *Импульс взрыва. Давление детонации.*
62. *Влияние импульса и давления в ударной волне на фугасное и бризантное*

действие взрыва.

63. *Параметры воздушной ударной волны и их характеристики.*

64. *Понятие о зарядах, находящихся в оболочке.*

65. *Ударная волна как функция времени.*

66. *Форма ударной волны и ее характеристики.*

67. *Горение углеводов.*

68. *Горение углерода.*

69. *Группы строительных материалов по возгораемости (огнестойкости).*

70. *Особенности горения взрывчатых веществ.*

71. *Переход дефлаграционного горения в детонацию.*

72. *Показатели пожаро- и взрывоопасности веществ и материалов. Их классификация и характеристики.*

73. *Показатели токсичности продуктов горения.*

74. *Последствия пожаров.*

- | | |
|-------------------|---|
| Уметь,
Владеть | <ol style="list-style-type: none"> 1. Рассчитать стандартную температуру самовоспламенения вещества в воздухе по средней длине углеродной цепи. 2. Рассчитать коэффициент избытка воздуха при горении вещества на нижнем концентрационном пределе. 3. Рассчитать коэффициент избытка воздуха при горении вещества на верхнем концентрационном пределе. 4. Рассчитать температуру горения стехиометрической смеси вещества в воздухе. 5. Рассчитать температуру горения вещества в воздухе на нижнем концентрационном пределе. 6. Рассчитать концентрацию кислорода в продуктах горения вещества на нижнем концентрационном пределе. 7. <i>Рассчитать возможность образования взрывоопасных концентраций при смешении определенных объемов горючего газа и воздуха.</i> 8. <i>Рассчитать возможность образования взрывоопасных концентраций при смешении определенных объемов нескольких горючих газов и воздуха.</i> 9. <i>Рассчитать наиболее пожаровзрывоопасную концентрацию горючего газа или пара ГЖ в воздухе.</i> 10. <i>Рассчитать наиболее пожаровзрывоопасную концентрацию горючего газа или пара ГЖ в кислороде.</i> 11. <i>Рассчитать наибольшее количество жидкости, при испарении которой в определенном объеме создается взрывоопасная концентрация ее паров.</i> 12. <i>Рассчитать наименьшее количество жидкости, при испарении которой в определенном объеме создается взрывоопасная концентрация ее паров.</i> 13. <i>Рассчитать количество жидкости, при испарении которой в определенном объеме создается наиболее взрывоопасная концентрация ее паров.</i> |
|-------------------|---|

Критерии оценивания компетенций*

Оценка «отлично» выставляется студенту, если он опираясь на круг задач в рамках поставленной цели и выбирая оптимальные способы их решения, исходя из действующих правовых норм, имеющихся ресурсов и ограничений способен на высоком уровне разрабатывает план действий для решения задач проекта; опираясь на современные тенденции развития техники и технологий в области техносферной безопасности, измерительной и вычислительной техники, информационных технологий при решении типовых задач в области профессиональной деятельности, связанной с защитой окружающей среды и обеспечением безопасности человека способен на высоком уровне

демонстрировать знание базовых математических, естественнонаучных и инженерных принципов в области техносферной безопасности, анализировать и применять технологии выполнения наиболее типичных операций применительно к сфере своей деятельности

Оценка «хорошо» выставляется студенту, если он опираясь на круг задач в рамках поставленной цели и выбирая оптимальные способы их решения, исходя из действующих правовых норм, имеющихся ресурсов и ограничений способен на среднем уровне разрабатывает план действий для решения задач проекта; опираясь на современные тенденции развития техники и технологий в области техносферной безопасности, измерительной и вычислительной техники, информационных технологий при решении типовых задач в области профессиональной деятельности, связанной с защитой окружающей среды и обеспечением безопасности человека способен на среднем уровне демонстрировать знание базовых математических, естественнонаучных и инженерных принципов в области техносферной безопасности, анализировать и применять технологии выполнения наиболее типичных операций применительно к сфере своей деятельности

Оценка «удовлетворительно» выставляется студенту, если он опираясь на круг задач в рамках поставленной цели и выбирая оптимальные способы их решения, исходя из действующих правовых норм, имеющихся ресурсов и ограничений способен на минимальном уровне разрабатывает план действий для решения задач проекта; опираясь на современные тенденции развития техники и технологий в области техносферной безопасности, измерительной и вычислительной техники, информационных технологий при решении типовых задач в области профессиональной деятельности, связанной с защитой окружающей среды и обеспечением безопасности человека способен на минимальном уровне демонстрировать знание базовых математических, естественнонаучных и инженерных принципов в области техносферной безопасности

Оценка «неудовлетворительно» выставляется студенту, если он не способен определять круг задач в рамках поставленной цели и выбирать оптимальные способы их решения, исходя из действующих правовых норм, имеющихся ресурсов и ограничений; не владеет современными тенденциями развития техники и технологий в области техносферной безопасности, измерительной и вычислительной техники, информационных технологий при решении типовых задач в области профессиональной деятельности, связанной с защитой окружающей среды и обеспечением безопасности человека

Список рекомендуемой работы

Основная литература

1. Кукин, П. П. Теория горения и взрыва : учебное пособие / П. П. Кукин, В. В. Юшин, С. Г. Емельянов ; Юго-Западный гос. ун-т, Рос. гос. технолог. ун-т им. К. Э. Циолковского (МАТИ-РГТУ). – М. : Юрайт, 2015. – 435 с. : ил., табл. – (Бакалавр). – Гриф: Доп. УМО. – Библиогр.: с. 433-435. – ISBN 978-5-9916-2722-1
2. Теория горения и взрывов [Электронный ресурс] : практикум / . — Электрон. текстовые данные. — Новосибирск: Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики, 2015. — 97 с. — 2227-8397. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/55503.html>

Дополнительная литература

1. Девисилов, В. А. Теория горения и взрыва : практикум : учеб. пособие для вузов / В.А. Девисилов, Т.И. Дроздова, С.С. Тимофеева. – Москва : ФОРУМ, 2012. – 351 с. : ил. ; 22. – (Высшее образование). – Гриф: Рек. УМО. – Библиогр.: с. 286-287. – ISBN 978-5-91134-555-6
2. Горев В.А. Теория горения и взрыва [Электронный ресурс] : учебное пособие / В.А. Горев. — Электрон. текстовые данные. — М. : Московский государственный строительный университет, ЭБС АСВ, 2010. — 200 с. — 2227-8397. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/16330.html>
3. Матерова С.И. Химия процессов горения [Электронный ресурс] : учебное пособие / С.И. Матерова. — Электрон. текстовые данные. — Железногорск: Сибирская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, 2017. — 63 с. — 2227-8397. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/66930.html>