

Министерство образования и науки Российской Федерации
Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет

ТЕОРИЯ ГОРЕНИЯ И ВЗРЫВА

Методические указания
по выполнению курсовой работы

Составитель Н. Ю. Клименти

Волгоград. ВолгГАСУ. 2016



© Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Волгоградский государственный
архитектурно-строительный университет», 2016



УДК 614.841.11(076.5)
ББК 38.9602я73
Т338

Т338 **Теория** горения и взрыва [Электронный ресурс] : методические указания по выполнению курсовой работы / М-во образования и науки Рос. Федерации, Волгогр. гос. архит.-строит. ун-т ; сост. Н. Ю. Клименти. — Электронные текстовые и графические данные (0,5 Мбайт). — Волгоград : ВолгГАСУ, 2016. — Учебное электронное издание сетевого распространения. — Систем. требования: PC 486 DX-33; Microsoft Windows XP; Internet Explorer 6.0; Adobe Reader 6.0. — Официальный сайт Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Режим доступа: <http://www.vgasu.ru/publishing/on-line/> — Загл. с титул. экрана.

Методические указания содержат методику выполнения и расчета курсовой работы по теме «Прогнозирование пожаровзрывоопасности и динамики развития пожара на объекте». Приведены примеры решения задач по определению параметров пожарной опасности веществ и материалов. Издание также содержит задания для индивидуального самостоятельного расчета курсовой работы.

Для студентов специальности «Пожарная безопасность» по дисциплине «Физико-химические основы развития и тушения пожаров».

УДК 614.841.11(076.5)
ББК 38.9602я73

План выпуска учеб.-метод. документ. 2016 г., поз. 39

Начальник РИО *М. Л. Песчаная*

Минимальные систем. требования:
PC 486 DX-33; Microsoft Windows XP; Internet Explorer 6.0; Adobe Reader 6.0

Подписано в свет 29.08.2016.
Гарнитура «Таймс». Уч.-изд. л. 2,1. Объем данных 0,5 Мбайт

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет»
Редакционно-издательский отдел
400074, Волгоград, ул. Академическая, 1
<http://www.vgasu.ru>, info@vgasu.ru

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	4
1. Организационно-методические указания по содержанию, объему, оформлению и порядок представления на проверку преподавателю курсовой работы	5
1.1. Пояснительная записка	5
1.2. Графическая часть	6
2. Исходные данные для выполнения курсовой работы	8
3. Некоторые сведения из молекулярной физики	12
4. Аналитическая оценка параметров пожаровзрывоопасности веществ, обращающихся в производстве	14
4.1. Определение теоретического количества воздуха, необходимого для горения исследуемого вещества (ГЖ)	15
4.1.1. Расчет количества воздуха и продуктов горения	16
4.1.2. Определение теоретической температуры горения и давления взрыва горючей жидкости	19
4.2. Концентрационные пределы распространения пламени	21
4.2.1. Расчет КПП по аппроксимационной формуле	22
4.2.2. Расчет НКПП индивидуальных соединений по предельной теплоте сгорания	24
4.2.3. Расчет концентрационных пределов распространения пламени для смеси горючих веществ	25
4.3. Расчет температурных пределов распространения пламени	26
4.4. Расчет температуры вспышки	28
4.5. Основные параметры вещества	30
4.6. Огнетушащие вещества	32
5. Прогнозирование динамики развития пожара на объекте	34
5.1. Расчет динамики развития площади пожара, построение графика и плана развития пожара	35
5.2. Тепловой баланс внутреннего пожара	38
5.3. Расчет динамики изменения высоты нейтральной зоны во времени и построение графика	39
5.4. Расчет динамики измерения фактической интенсивности газообмена во времени	41
6. Содержание выводов по работе	45
Приложения	46
Список использованной литературы	53

ВВЕДЕНИЕ

Рост объемов производства, а также неуклонный рост числа пожаров повысил интерес к проблемам неорганизованного горения. Пожары стали рассматривать как комплекс взаимосвязанных процессов и явлений. Начались разработки новых огнетушащих веществ, новых способов применения уже существующих.

Борьба с пожарами, а значит и развитие науки о пожарах в целом, в том числе и изучение процессов горения на пожаре, стали очень важной задачей современного общества.

«Физико-химические основы развития и тушения пожаров» — дисциплина, предметом изучения которой являются физические и химические процессы и явления, происходящие при развитии и прекращении горения на пожаре. Знание основных закономерностей протекания и прекращения горения позволяет эффективно решать конкретные задачи профилактики и тушения пожаров. Материал курса является основой при проведении расчетов курсовой работы.

Приступая к выполнению курсовой работы, необходимо уяснить, что горение — это основной процесс на пожаре. Знание сути явления, законов горения, механизмов и способов его прекращения необходимы для успешной работы инженера пожарной безопасности в любой области его деятельности.

1. ОРГАНИЗАЦИОННО-МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО СОДЕРЖАНИЮ, ОБЪЕМУ, ОФОРМЛЕНИЮ И ПОРЯДОК ПРЕДСТАВЛЕНИЯ НА ПРОВЕРКУ ПРЕПОДАВАТЕЛЮ КУРСОВОЙ РАБОТЫ

Выполнению курсовой работы должно предшествовать изучение соответствующего теоретического материала по дисциплинам. Обязательному изучению до выполнения курсовой работы подлежат материалы дисциплины «Физико-химические основы развития и тушения пожара».

Предлагаемая студентам для выполнения курсовая работа предусматривает прогнозирование пожаровзрывоопасности и динамики развития пожара на объекте.

Курсовая работа имеет цель:

закрепить и углубить знания по дисциплинам «Теория горения и взрыва» и «Физико-химические основы развития и тушения пожаров»;

научить студентов применять полученные знания для оценки пожаровзрывоопасности веществ и материалов, обращающихся в производстве воинских частей и предприятий, и качественного прогнозирования динамики развития пожаров в помещениях;

научить принимать правильное инженерно-техническое решение, выполнять сложные расчеты и графически оформлять их результаты;

овладеть методами работы с нормативной научно-технической и справочной литературой.

Курсовая работа оформляется в виде расчетно-пояснительной записки и чертежа. При выполнении работы следует пользоваться только международной системой физических единиц СИ.

1.1. Пояснительная записка

Пояснительная записка оформляется на стандартных листах писчей бумаги форматом А4 (210×297 мм); другая сторона листа используется для внесения в работу необходимых исправлений. Текст работы должен быть написан разборчиво чернилами или шариковой ручкой. Работа должна быть аккуратно оформлена, страницы пронумерована.

Образец титульного листа курсовой работы приведен в прил. .

Пояснительная записка должна содержать:

1. Аналитическую оценку параметров пожаровзрывоопасности веществ, обращающихся в производстве;

- 1.1. Исходные данные для выполнения первой части курсовой работы;
 - 1.2. Описание физико-химических свойств веществ;
 - 1.3. Определение теоретического количества воздуха, необходимого для горения исследуемого вещества (только ГЖ);
 - 1.4. Определение объема и состава продуктов, выделившихся при сгорании вещества (только ГЖ);
 - 1.5. Определение температуры и давления взрыва горючей смеси;
 - 1.6. Определение КПП пламени ГЖ и смеси газов;
 - 1.7. Определение $T_{вс}$, ТПР пламени ГЖ;
 - 1.8. Составление сравнительной таблицы по расчетным и справочным данным параметров пожаровзрывоопасности вещества и выводы;
 2. Прогнозирование динамики развития пожара на объекте;
 - 2.1. Исходные данные для выполнения второй части курсовой работы;
 - 2.2. Расчет динамики развития площади пожара, построение графика и плана развития пожара;
 - 2.3. Расчет динамики изменения температуры пожара, построение графика ее изменения во времени;
 - 2.4. Расчет динамики изменения высоты нейтральной зоны во времени и построение графика;
 - 2.5. Расчет динамики изменения фактической и требуемой интенсивности газообмена во времени и построение графика;
 - 2.6. Оценку возможности тушения пожара АУ газового пожаротушения;
 - 2.7. Выводы и заключение;
- Объем пояснительной записки 25-30 листов.

1.2. Графическая часть

Объем графической части курсовой работы определяется схемой и графиками, выносимыми на чертеж согласно заданию.

Ориентировочный объем графической части расчетно-графической работы — один лист формата А2.

При выполнении графической части необходимо руководствоваться требованиями единой системы конструкторской документации (ЕСКД).

Графическая часть должна содержать:

1. Схему производственного помещения с планом развития пожара;
2. График изменения площади пожара во времени;
3. График изменения температуры пожара во времени;
4. График изменения высоты нейтральной зоны во времени;
5. График изменения фактической и требуемой интенсивности газообмена во времени.

Задача:

В полном объеме и в срок отработать все вопросы, выносимые на курсовую работу. Оформить пояснительную записку и графическую часть. Изучить исходные данные:

- горючие вещества, их количество и параметры окружающей среды.
- вид планировки помещений и исходные данные для расчетов.

Курсовая работа, требующая исправлений, возвращается студенту и подлежит повторному направлению на рецензию. После этого выставляется оценка в установленный срок. В случае необходимости преподаватель может путем устного опроса уточнить понимание отдельными студентами сущности того или иного вопроса.

Исходные данные для выполнения 1 части курсовой работы принять по табл. 1, 2; по 2 части — принять по табл. 3-4 в соответствии с номером студента по учебному журналу.

2. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ КУРСОВОЙ РАБОТЫ

Таблица 1

№ варианта	Наименование горючей жидкости	Количество горючей жидкости, кг	Состав смеси горючих газов,		
			C ₂ H ₂	C ₂ H ₆	CH ₄
1.	Амилбензол (126)	5	25	25	25
2.	Н-Амиловый спирт (128)	50	30	25	25
3.	Анизол (141)	10	30	30	25
4.	Анилин (141)	55	30	30	30
5.	Бензин (спр.)	15	35	30	30
6.	Бутилацетат (187)	45	40	30	25
7.	Бутиловый спирт (193)	20	45	30	20
8.	Бензол (165)	40	50	30	15
9.	Диэтиловый эфир (320)	25	55	30	10
10.	Дизельное топливо (спр.)	35	60	30	5
11.	Уайт-спирит (2-251)	30	70	20	5
12.	Этиленгликоль (2-335)	60	75	15	5
13.	трет-Амиловый спирт (128)	100	80	10	5
14.	Керосин (спр.)	65	85	5	5
15.	Гексан (217)	95	30	35	30
16.	Метиловый спирт (479)	70	25	40	30
17.	Толуол (2-230)	90	20	45	30
18.	Стирол (2-206)	75	15	50	30
19.	Пентан (2-82)	85	10	55	30
20.	Этанол (2-326)	80	5	60	30
21.	Амилметилкетон (127)	105	25	20	30
22.	Бутилбензол (189)	120	25	15	40
23.	Бутилвиниловый эфир (190)	110	20	10	55
24.	Ацетон (152)	115	15	10	65
25.	Метиловый спирт (479)	70	25	35	10
26.	Этанол (2-326)	90	15	40	5
27.	Амилметилкетон (127)	85	10	45	35
28.	Бутилбензол (189)	85	30	50	15
29.	Уайт-спирит (2-251)	30	10	55	20
30.	трет-Амиловый спирт (128)	20	25	20	45
31.	Гексан (217)	100	30	35	5
32.	Этиленгликоль (2-335)	70	15	40	10
33.	Этанол (2-326)	85	5	45	35
34.	Пентан (2-82)	90	10	50	30

Таблица 2

№ варианта	% об. H ₂ S	Объем смеси горючих газов, м ³	Параметры окружающей среды				
			Температура, °С	Т п.г. К	Давление, мм рт. ст.	Р п.г. кПа	К избытка воздуха
1	25	125	28	1400	740	100	1,8
2	20	120	16	1420	774	99	1,1
3	15	115	27	1440	742	98	1,7
4	10	110	17	1460	772	97	1,2
5	5	105	26	1480	744	96	1,6
6	5	100	18	1500	770	95	1,3
7	5	95	25	1520	746	94	1,5
8	5	90	19	1540	768	93	1,4
9	5	85	24	1560	748	92	1,8
10	5	80	20	1580	766	91	1,1
11	5	70	21	1620	764	89	1,2
12	5	65	22	1640	752	88	1,6
13	5	60	28	1660	762	87	1,3
14	5	55	16	1680	754	86	1,5
15	5	50	27	1700	758	85	1,4
16	5	45	17	1610	756	90,5	1,8
17	5	40	26	1630	740	89,5	1,1
18	5	35	18	1650	774	88,5	1,7
19	5	30	25	1670	742	87,5	1,2
20	5	25	19	1690	772	86,5	1,6
21	25	20	24	1410	744	100,5	1,3
22	20	15	20	1430	770	99,5	1,5
23	15	10	23	1450	746	98,5	1,4
24	10	5	21	1470	768	97,5	1,8
25	30	65	25	1440	770	86	1,1
26	40	60	19	1600	762	90	1,6
27	10	45	24	1460	744	81	1,4
28	5	40	20	1570	756	92	1,2
29	15	35	23	1610	755	100	1,1
30	10	70	20	1480	769	87	1,9
31	30	30	16	1560	741	96	1,3
32	35	25	13	1500	744	91	1,8
33	15	85	20	1410	765	83	1,7
34	10	80	16	1440	740	95	1,1

Таблица 3

№ варианта	Размеры помещения, м		Вид планировки помещения, № схемы	Размеры окон, м	Размеры дверей, м	Предел огнестойкости дверей, ч
	Параметр А	Высота Н		ш × h	ш × h	
1.	4	5,0	1	1 x 2	0,80 x 2	0,08
2.	23	5,7	2	3 x 3,9	2,00 x 2	0,45
3.	5	3,2	3	1,1 x 2,3	0,85 x 2	0,10
4.	22	5,5	4	2,9 x 3,7	1,95 x 2	0,43
5.	6	3,4	5	1,2 x 2,6	0,90 x 2	0,12
6.	21	5,3	6	2,8 x 3,6	1,90 x 2	0,42
7.	7	3,6	7	1,3 x 2,5	0,95 x 2	0,13
8.	20	5,1	8	2,7 x 3,4	1,85 x 2	0,40
9.	8	3,8	9	1,4 x 2,6	1,00 x 2	0,15
10.	19	6,0	10	2,6 x 4,4	1,8 x 2	0,38
11.	18	5,8	12	2,5 x 4,2	1,75 x 2	0,37
12.	10	4,2	13	1,6 x 2,8	1,10 x 2	0,18
13.	17	5,6	14	2,4 x 4,1	1,70 x 2	0,35
14.	11	4,4	15	1,7 x 2,9	1,15 x 2	0,20
15.	16	5,4	16	2,3 x 4,0	1,65 x 2	0,33
16.	12	4,6	17	1,8 x 3,5	1,20 x 2	0,22
17.	15	5,2	18	2,2 x 4,2	1,60 x 2	0,32
18.	13	4,8	19	1,9 x 3,9	1,25 x 2	0,23
19.	14	5,0	20	2,1 x 3,8	1,55 x 2	0,30
20.	24	5,9	21	2 x 4,6	1,30 x 2	0,25
21.	25	3,0	22	3,1 x 2,2	1,50 x 2	0,27
22.	26	4,0	23	3,2 x 2,1	1,35 x 2	0,28
23.	27	5,0	24	3,3 x 3,1	1,45 x 2	0,07
24.	28	6,0	25	3,4 x 4	1,40 x 2	0,05
25.	6	4,3	26	1x3,5	1,45x2	0,40
26.	12	4,8	27	3x3,9	2,00x2	0,23
27.	20	5,1	28	2,3x2	1,23x2	0,11
28.	16	6,0	29	2,2x4	1,11x2	0,22
29.	14	4,6	30	1,6x2,2	1,67x2	0,24
30.	8	5,4	31	3,2x4,6	1,34x2	0,35
31.	10	4,9	32	2,1x1,9	1,29x2	0,12
32.	24	5,1	33	1,8x3,4	1,86x2	0,19
33.	9	5,9	34	2x1,8	1,27x2	0,24
34.	12	4,0	35	3x2,1	1,91x2	0,30

Таблица 4

№ варианта	Расстояние от пола до подоконника, м	Горючая нагрузка по помещениям, № варианта	Вид нейтрального газа	Расход нейтрального газа, $\text{м}^3 \cdot \text{с}^{-1}$	Место возникновения пожара	Расчетные моменты времени, мин.
1	0,70		Гелий	3,0		5,10,15,20,25,30
2	1,55		Углекислый	20,0		10,16,22,28,34,40
3	0,60		Азот	4,0		6,10,16,21,26,30
4	1,50		Углекислый	19,0		7,12,19,26,33,40
5	0,50		Аргон	3,5		7,10,17,22,27,30
6	1,45		Углекислый	18,0		10,17,23,27,33,40
7	0,80		Гелий	4,5		8,10,18,23,28,30
8	1,40		Углекислый	17,0		10,18,24,30,36,40
9	0,90		Аргон	5,0		10,14,18,22,26,30
10	1,35		Углекислый	16,0		5,10,15,20,30,40
11	1,30		Углекислый	14,0		10,20,25,30,35,40
12	1,10		Гелий	5,5		9,15,19,24,29,35
13	1,25		Углекислый	15,0		10,15,20,25,30,35
14	1,20		Азот	6,0		5,10,20,25,30,35
15	1,15		Углекислый	13,0		10,15,20,25,30,35
16	0,85		Аргон	6,5		5,11,17,23,29,35
17	0,75		Углекислый	12,0		3,7,14,21,28,35
18	0,65		Гелий	7,5		6,10,16,20,26,35
19	0,95		Аргон	11,0		10,15,20,25,30,35
20	1,05		Углекислый	8,0		3,8,16,24,32,40
21	0,55		Азот	10,0		10,15,20,25,30,35
22	1,60		Аргон	9,0		10,14,18,22,26,30
23	1,65		Гелий	12,5		5,10,15,20,30,40
24	1,70		Углекислый	14,5		8,10,18,23,28,30
25	0,6		Гелий	6,3		5,10,15,25,30,35
26	0,75		Углекислый	14,2		5,10,14,20,23,29
27	1,70		Азот	12,6		6,10,16,20,25,30
28	1,65		Углекислый	16,1		5,12,18,24,32,40
29	1,60		Аргон	8,3		3,7,14,21,28,35
30	0,75		Гелий	15,0		4,9,14,20,25,30
31	1,65		Углекислый	14,9		9,15,19,24,29,35
32	1,70		Азот	9,3		5,10,18,24,29,36
33	1,45		Углекислый	10,6		8,12,20,24,29,37
34	0,95		Аргон	17,2		5,8,14,18,26,35

3. НЕКОТОРЫЕ СВЕДЕНИЯ ИЗ МОЛЕКУЛЯРНОЙ ФИЗИКИ

Прежде чем рассмотреть типовые задачи, напомним о наиболее важных понятиях молекулярной физики, с которыми часто приходится сталкиваться при решении многих практически важных задач. *1 моль вещества* — количество вещества, масса которого численно равна молекулярной массе, выраженной в граммах. Например, масса 1 моля водорода (H_2) равна 2 г/моль или $2 \cdot 10^{-3}$ кг/моль, а масса 1 моля метана (CH_4) — 16 г/моль или $16 \cdot 10^{-3}$ кг/моль. 1 киломоль вещества в тысячу раз больше 1 моля, поэтому его масса в 10^3 раз больше, например, для метана масса 1 киломоля составляет 16 кг/кмоль.

Примечание. При определении массы моля вещества можно воспользоваться таблицей II приложения, где приведены атомные массы элементов.

В связи с тем, что масса 1 моля вещества численно равна его молекулярной массе, то в 1 моле любого вещества содержится одинаковое количество молекул $N = 6,02 \cdot 10^{23}$ молекул/моль (*число Авогадро*). В газообразном состоянии 1 моль любого вещества при нормальных условиях занимает объем, равный 22,4 л. Таким образом, объем 1 моля любого газа при $T_0 = 273$ К и $P_0 = 1,013 \cdot 10^5$ Па составляет $22,4 \cdot 10^{-3}$ м³/моль. Объем 1 киломоля в тысячу раз больше и равен 22,4 м³/кмоль.

Объем 1 моля газа можно определить из уравнения состояния (Клапейрона — Менделеева):

$$PV = \frac{m}{M}RT, \quad (1)$$

где m — масса вещества; M — масса одного моля; R — универсальная газовая постоянная, $R = 8,31$ [Дж/(моль·К)].

Для 1 моля ($m/M = 1$) объем газа при нормальных условиях

$$V_0 = \frac{RT_0}{P_0} = \frac{8,31 \text{ Дж}/(\text{моль} \cdot \text{К}) 273 \text{ К}}{1,013 \cdot 10^5 \text{ Па}} = 22,4 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{моль},$$

(Дж = Н · м, Па = Н/м²).

Плотность вещества в газообразном состоянии при нормальных условиях

$$\rho = \frac{M}{V_0}. \quad (2)$$

Если условия отличаются от нормальных, необходимо ввести поправки на температуру и давление. Для этого можно использовать объединенный газовый закон:

$$\frac{PV}{T} = \frac{P_0V_0}{T_0} \rightarrow V = V_0 \frac{P_0T}{PT_0}. \quad (3)$$

Использование таких величин, как масса и объем 1 моля вещества позволяет значительно упростить решение многих практически важных задач. Например, при определении объема паров по известной массе испарившейся жидкости или определении объема, занимаемого газом вышедшего из баллона, когда известна потеря массы в нем.

4. АНАЛИТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ ПОЖАРОВЗРЫВООПАСНОСТИ ВЕЩЕСТВ, ОБРАЩАЮЩИХСЯ В ПРОИЗВОДСТВЕ

Процесс горения как одна из форм физико-химического взаимодействия атомов и молекул может быть по-настоящему понятен только на основе изучения молекулярно-кинетической теории строения материи.

Необходимо представлять, что в химических процессах, прежде чем образуются новые молекулы, разрушаются старые. Энергия, необходимая для разрыва связей в молекулах горючего и окислителя, называется *энергией активации*. Разрушение или ослабление химических связей в молекулах происходит под действием теплового движения атомов. Чем выше температура, тем выше доля активных молекул, тем эффективнее соударения и больше их число. Для реакции горения, как и для многих других химических реакций, справедливо положение: повышение температуры на 10 °С приводит к увеличению ее скорости в два раза (*закон Аррениуса*). Кроме того, скорость реакции согласно закону действующих масс увеличивается с возрастанием концентрации реагентов. Скорость горения максимальна при стехиометрическом составе смеси — когда отношение реагентов соответствует коэффициентам в уравнении реакции.

Горению как химической реакции, идущей с большим выделением тепла, соответствует ряд физических явлений. Например, происходит перенос тепла реагирующих веществ и продуктов горения теплопроводностью за счет молекулярной и турбулентной диффузии. Тепломассообмен также осуществляется за счет конвекции. Лучистая теплопередача также способствует теплообмену. Все перечисленные процессы взаимосвязаны. Скорость химической реакции горения определяется процессами теплопередачи, взаимной диффузией горючего, окислителя, продуктов горения. В свою очередь, температура, скорость горения зависят от интенсивности химической реакции. Важная особенность явления горения — способность к пространственному распространению (лесные и степные пожары).

В горении физические процессы и условия являются доминирующими и определяют вид горения, его параметры, но в основе горения лежит химическое превращение горючего и окислителя в продукты горения. На пожаре чаще всего наблюдается турбулентное, диффузионное, гомогенное горение.

Показатели пожаро- и взрывоопасных свойств материалов определяют на всех стадиях процесса горения: воспламенения, горения и тушения с учетом

их агрегатного состояния. Так, например, температура вспышки и температурные пределы распространения пламени изучаются при горении жидкостей, температура самовоспламенения при рассмотрении механизма этого явления и т.д.

Для оценки пожароопасных свойств веществ и материалов используют расчетные и экспериментальные методы. Большинство расчетных методов являются приближенными, носят характер эмпирических зависимостей. Таким примером являются формулы для определения температуры самовоспламенения по средней длине углеродной цепи, концентрационных пределов распространения пламени и другие.

При выполнении курсовой работы необходимо четко представлять себе, что процесс горения на пожаре является главным, но не единственным. Пожар представляет собой комплекс взаимосвязанных процессов горения, теплообмена и газообмена, которые служат причиной таких вторичных явлений как задымление, объемная вспышка, взрывы, обрушения и т.д. При анализе пожара его принято разбивать на три зоны: горения, теплового воздействия и задымления. Каждая из них имеет свои особенности и характеристики, зависящие от вида пожара. По характеру тепло- и газообмена пожары делят на два вида: открытые и внутренние. *Открытыми* называются пожары, в которых присутствует теплогазообмен только зоны горения с окружающей средой. Это пожары, протекающие на открытом пространстве. *Внутренними* называются пожары, протекающие в помещениях. В этих случаях при анализе пожара приходится учитывать также процессы тепло- и газообмена зоны горения с ограждающими конструкциями и помещения с внешней средой.

4.1. Определение теоретического количества воздуха, необходимого для горения исследуемого вещества (ГЖ)

Обобщенная запись брутто-уравнения материального и теплового баланса реакции горения имеет вид:

$$n_{\Gamma} [\Gamma] + n_o [o] = n_{\text{пр}i} [\text{пр}] + Q, \quad (4)$$

где: n_{Γ} , n_o , $n_{\text{пр}i}$ — стехиометрические коэффициенты при соответствующих веществах ([Γ] — горючее, [o] — окислитель, [пр] — продукты горения); Q — тепловой эффект химической реакции.

Для составления материального баланса процессов горения используют уравнения элементарных реакций окисления элементов, входящих в состав горючего, выражен в массовых процентах каждого химического элемента на единицу массы горючего.

Для индивидуальных соединений запись уравнения материального баланса осуществляется сразу, но принцип остается тот же.

Для смесей горючих газов записывают уравнение материального баланса каждого газа.

Во время горения реакции между горючим, продуктами его термического разложения протекают в объеме пламени — в зоне горения.

Минимальное (теоретическое) количество воздуха, необходимое для полного сжигания 1 кг твердого или жидкого горючего материала или 1 м³ горючего газа, — называется *теоретическим количеством воздуха* и обозначается V_B^0 . Действительное количество воздуха $V_B^{пр}$ является произведением коэффициента избытка воздуха α и теоретического количества воздуха V_B^0 .

Коэффициент избытка воздуха (α) показывает, во сколько раз объем воздуха, поступивший на горение, больше теоретического объема воздуха, необходимого для полного сгорания единицы количества вещества в стехиометрической смеси.

Полный, действительный объем продуктов горения находится с учетом избытка воздуха ($\alpha > 1$):

$$V_{пр} = V_{пр}^0 + (\alpha - 1)V_B^0. \quad (5)$$

Расчет ведется на 1 кг (1 кмоль, 1 м³) твердого, жидкого или газообразного горючего.

Адиабатической температурой горения называется температура, до которой нагреваются продукты горения, когда все тепло, выделившееся при горении, идет на их нагрев.

Действительная температура горения всегда ниже адиабатической, так как часть тепла теряется на излучение.

4.1.1. Расчет количества воздуха и продуктов горения

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

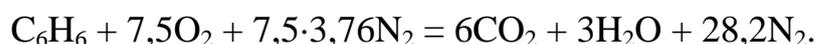
$$\Delta V = V_B - V_B^0 \quad (6)$$

или

$$\Delta V_B = V_B^0 (\alpha - 1). \quad (7)$$

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

При составлении уравнения материального баланса процессов горения принято учитывать не только кислород, принимающий участие в реакции окисления, но и азот, входящий в состав воздуха. Так как на один кмоль кислорода в воздухе приходится 3,76 кмоль азота (состав воздуха: 21 % O₂ и 79 % N₂), то материальный баланс процесса горения, например, бензола в воздухе можно записать так:



Из этого уравнения видно, что для полного сгорания 1 кмоль бензола требуется $(7,5 + 7,5 \cdot 3,76)$ кмоль воздуха ($7,5$ кмоль O_2 и $7,5 \cdot 3,76$ кмоль, не принимающего участия в горении N_2). При сгорании образуется 6 кмоль CO_2 , 3 кмоль H_2O и остается непрореагировавшим $(7,5 \cdot 3,76) = 28,2$ кмоль N_2 .

В общем виде можно записать:

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

где n_{O_2} , n_{N_2} , n_T — число кмоль кислорода, азота и горючего вещества в уравнении материального баланса, [кмоль].

Аналогично объем продуктов горения:

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

где: $V_{N_2}^0$ — объем азота, рассчитанный из уравнения материального баланса, [кмоль/кмоль].

Объем продуктов горения:

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

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

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

и в продуктах горения появится кислород

$$V_{O_2} = 0,21\Delta V_B. \quad (11)$$

В этом случае полный объем продуктов горения

$$V_{пр} = V_{пр}^0 + \Delta V_B \quad (12)$$

или

$$V_{пр} = V_{CO_2} + V_{H_2O} + V_{N_2} + V_{O_2}. \quad (13)$$

Иногда на практике приходится решать обратную задачу по известному содержанию кислорода (φ_{O_2} , об. %) в продуктах горения находить коэффициент избытка воздуха, с которым протекало горение вещества

$$\alpha = 1 + \frac{\varphi_{O_2} V_{пр}^0}{V_B^0 (21 - \varphi_{O_2})}. \quad (14)$$

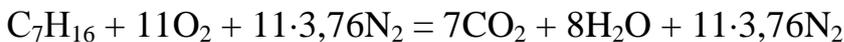
Для веществ, у которых объем продуктов горения равен объему израсходованного воздуха (например, горение углерода, серы), эта формула упрощается

$$\alpha = \frac{21}{21 - \varphi_{\text{O}_2}}. \quad (15)$$

Для газообразных горючих веществ расчет объемов воздуха и продуктов горения чаще всего проводят в м³/м³. Так как 1 кмоль любого газа в одинаковых условиях занимает один и тот же объем (при нормальных условиях 22,4 м³), то объем, рассчитанный в м³/м³, численно будет таким же, как и в кмоль/кмоль.

Если горючее вещество находится в конденсированном состоянии (жидком или твердом), то, как правило, расчеты объемов воздуха и продуктов горения проводят в м³/кг. Для этого кмоль воздуха или продукта горения переводят в м³, умножая на объем одного кмоль газа (22,4 м³/кмоль), а кмоль горючего переводят в кг, умножая на массу одного киломоля горючего (M_r, кг/кмоль).

Например, при сгорании 1 кг гептана



требуется воздуха:

$$V_{\text{B}}^0 = \frac{(n_{\text{O}_2} + n_{\text{N}_2}) \cdot 22,4}{n_{\text{r}} M_{\text{r}}} = \frac{(11 + 11 \cdot 3,76) \cdot 22,4}{1 \cdot 100} = 11,7 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

образуется

$$V_{\text{CO}_2} = \frac{n_{\text{CO}_2} \cdot 22,4}{n_{\text{r}} M_{\text{r}}} = \frac{7 \cdot 22,4}{1 \cdot 100} = 1,57 \text{ м}^3/\text{кг}$$

и далее по химическому уравнению.

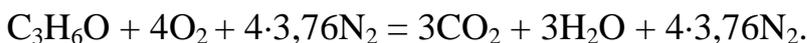
При сгорании смеси индивидуальных химических веществ расчет необходимого количества воздуха и объема продуктов горения проводят по каждому из веществ, а затем суммируют с учетом его процентного содержания в смеси.

Пример 1

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

Решение

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



Объем воздуха, необходимого для сгорания 1 кг ацетона:

$$V_{\text{B}}^0 = \frac{(n_{\text{O}_2} + n_{\text{N}_2}) \cdot 22,4}{n_{\text{r}} M_{\text{r}}},$$

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

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

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

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

а избыток воздуха:

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

Объем продуктов горения

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

С учетом избытка воздуха полный объем продуктов горения

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

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

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

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

$$V = \frac{22,4 P_0 T}{T_0 P}, \quad (16)$$

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

4.1.2. Определение теоретической температуры горения и давления взрыва горючей жидкости

Под *температурой горения* понимают максимальную температуру, до которой нагреваются продукты горения. Принято различать адиабатическую температуру горения, рассчитываемую без учета потерь тепла в окружающее пространство, и действительную температуру горения, учитывающую эти теплотери.

Температуру горения можно рассчитать, если известно количество теплоты, выделяемое при сгорании горючего вещества, состав и объем продуктов горения, их теплоемкость или теплосодержание. Тепловой эффект химической реакции горения (т.е. количество теплоты, выделяемое в ходе экзотермической реакции) называется низшей теплотой сгорания вещества $Q_{\text{н}}$.

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

$$Q_e = Q_n + Q_{\text{исп}}, \quad (17)$$

где Q_n — высшая теплота сгорания вещества.

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

$$Q_n = \left(\sum \Delta H_i n_i \right)_{\text{прод}} - \left(\sum \Delta H_i n_i \right)_{\text{исх}}, \quad (18)$$

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

Для расчета температуры горения составим уравнение теплового баланса, считая, что выделившееся в результате сгорания тепло нагревает продукты горения (CO_2 , H_2O , N_2) от начальной температуры T_0 до температуры T_r .

$$Q_n (1 - \eta) = \sum c_{p_{\text{пр}i}} V_{\text{пр}i} (T_r - T_0), \quad (19)$$

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

Пример 1

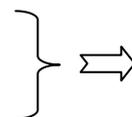
Определить необходимые параметры температуры и давления для взрыва керосина (КО — 20) при температуре 16 °С и давлении 754 мм.рт.ст. окружающей среды.

Решение

1. Рассчитываем стандартную теплоту сгорания 1 моля керосина КО-20

1000гр. - 43724,16 кДж

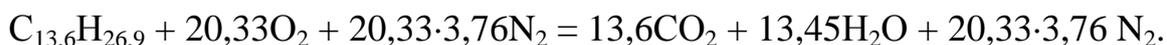
190,1гр. - X кДж



$$X = \frac{190,1 \cdot 43724,16}{1000} = 8311,96 \text{ кДж/моль}$$

$$\Delta H = 8311,96 \text{ кДж/моль}$$

2. Составляем химическое уравнение реакции горения



3. Определяем разность молей продуктов горения и исходной смеси.

$$n_{\text{ПГ}} = 13,6 + 13,45 + 20,33 \cdot 3,76 = 103,49 \text{ моль}$$

$$n_{\text{исх}} = 1 + 20,33 + 20,33 \cdot 3,76 = 97,77 \text{ моль}$$

$$\Delta n = n_{\text{ПГ}} - n_{\text{исх}} = 103,49 - 97,77 = 5,72 \text{ моль}$$

4. Определяем энергию взрыва, учитывая, что $T_1 = 2600 \text{ К}$; $T_2 = 2800 \text{ К}$, тогда:

$$U_1 = 13,6 \cdot 116,473 + 13,45 \cdot 91,603 + 3,76 \cdot 20,33 \cdot 65,15 = 7796,16 \text{ кДж};$$

$$U_2 = 13,6 \cdot 127,3 + 13,45 \cdot 100,555 + 3,76 \cdot 20,33 \cdot 70,865 = 8500,67 \text{ кДж}.$$

Внутренняя энергия продуктов взрыва при $T = 2600 \text{ К}$ меньше энергии взрыва, а при $T = 2800 \text{ К}$ больше, значит, $T_{\text{взр}}$ надо определять методом линейной интерполяции.

5. Находим температуру взрыва методом линейной интерполяции

$$T_{\text{взр}} = 2600 + \frac{(8298,22 - 7796,16) \cdot (2800 - 2600)}{8500,67 - 7796,16} = 2742,53 \text{ К}.$$

6. Определяем давление взрыва паров керосина в смеси с воздухом на стехиометрической концентрации и при заданных условиях по формуле:

$$P_{\text{взр}} = \frac{P_o T_{\text{взр}} \sum_{i=1}^n n_i}{T_o \sum_{i=1}^n m_i}; \quad (20)$$

$$P_{\text{взр}} = \frac{101,325 \cdot 2742,53 \cdot (13,6 + 13,45 + 20,33 \cdot 3,76)}{(273 + 16) \cdot (1 + 20,33 + 20,33 \cdot 3,76)} = 1151,55 \text{ кПа}.$$

4.2. Концентрационные пределы распространения пламени

Смеси горючих газов и паров с воздухом способны воспламеняться и распространять пламя только тогда, когда концентрация горючего в них находится в определенных ограниченных пределах, которые называются нижним (НКПР) и верхним (ВКПР) пределами распространения пламени.

В пределах одного гомологического ряда с увеличением относительной молекулярной массы пределы распространения пламени, выраженные в объемных процентах, уменьшаются. На нижнем пределе теплота сгорания большинства углеводородов соответствует примерно величине $1830 \dots 2050 \text{ кДж/м}^3$, а адиабатическая температура горения равна $1500 \text{ К} \pm 110 \text{ К}$. Эти данные свидетельствуют о том, что для воспламенения горючих веществ и распространения пламени необходимы определенные условия.

Концепции предельных температур и теплоты сгорания использованы при создании методик расчета нижнего концентрационного предела распространения пламени.

С увеличением температуры, как и следует из сущности предельных явлений, область распространения пламени расширяется, а с уменьшением давления сужается. Концентрационные пределы распространения пламени изменяются и от ряда других причин: присутствия в смеси флегматизатора или ингибитора, мощности источника зажигания.

Концентрационные пределы распространения пламени (КПР) являются едва ли не основной характеристикой пожароопасных свойств веществ и материалов. Мощность зажигающей искры, температура самовоспламенения, температура горения имеют смысл только внутри концентрационной области распространения пламени.

Пределы распространения пламени веществ и материалов определяют расчетными и экспериментальными методами.

Наряду с принятой системой определения пределов по концентрации горючего в смеси, в последние годы для твердых горючих материалов стал довольно широко применяться предел распространения пламени по кислороду, который находится экспериментально и носит название кислородного индекса (КИ). Этот параметр также зависит от давления, температуры. Кислородный индекс характеризует то минимальное содержание кислорода в смеси с азотом, при котором возможно воспламенение горючего материала с его последующим горением.

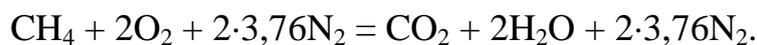
Пределы распространения пламени применяются в практике для классификации производств по степени их пожарной опасности, при расчете предельно допустимых концентраций горючих паров и газов в помещениях при производстве огневых работ, для расчета взрывоопасных режимов работ в среде, содержащей горючие газы и пары.

Исходя из важности КПР, в данных методических указаниях приведены примеры расчета концентрационных и температурных пределов распространения пламени.

4.2.1. Расчет КПР по аппроксимационной формуле

Газовая смесь горючего с окислителем способна воспламеняться и распространять пламя только при определенных концентрациях горючего. Минимальная концентрация горючего, при которой смесь способна воспламеняться и распространять пламя, называется нижним концентрационным пределом распространения пламени (НКПР), а максимальная концентрация горючего — верхним концентрационным пределом распространения пламени (ВКПР). При концентрациях горючего ниже НКПР и выше ВКПР его смеси с воздухом негорючи. Скорость распространения пламени и его температура минимальны в предельных смесях, т.е. при концентрациях горючего, равных НКПР и ВКПР. Максимальные значения скорости и температуры пламени, как правило, имеют смеси стехиометрического состава. Поэтому эти смеси наиболее пожаровзрывоопасны. Концентрацию горючего в стехиометрической смеси рассчитывают по уравнению горения.

Например, из уравнения горения видно, что стехиометрическая смесь метана с воздухом содержит 1 моль метана, 2 моля кислорода и 2·3,76 молей азота. Концентрация горючего в такой смеси




 стехиометрическая смесь

$$\varphi_{\text{стех}} = \frac{n_{\text{CH}_4} \cdot 100}{n_{\text{CH}_4} + n_{\text{O}_2} + n_{\text{N}_2}} = \frac{1 \cdot 100}{1 + 2 + 2 \cdot 3,76} = 9,5 \text{ \%}.$$

Значения концентрационных пределов распространения пламени, приведенные в справочной литературе, установлены экспериментально. Для большинства веществ они могут быть приближенно рассчитаны по формулам. По аппроксимационной формуле можно рассчитывать значения как нижнего, так и верхнего концентрационных пределов распространения пламени

$$\varphi_{\text{н(в)}} = \frac{100}{an + b}, \quad (21)$$

где n — число молей кислорода, необходимое для полного сгорания одного моля горючего вещества, находим из уравнения реакции горения (стехиометрический коэффициент при кислороде); a и b — константы, имеющие определенные значения для нижнего и верхнего пределов в зависимости от значения n , приведены в табл. 5.

Таблица 5

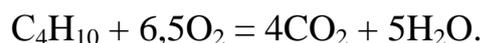
Область применения	a	b
Для вычисления нижнего предела	8,684	4,679
Для вычисления верхнего предела		
при $n < 7,5$	1,550	0,560
при $n > 7,5$	0,768	6,554

Пример 1

Рассчитать КПП бутана в воздухе. Расчет провести по аппроксимационной формуле.

Решение

Для расчета необходимо знать число молей кислорода, необходимое для полного сгорания 1 моля бутана. Запишем уравнение горения бутана



Из уравнения видно, что $n = 6,5$.

Рассчитываем нижний концентрационный предел распространения пламени по аппроксимационной формуле, воспользовавшись значениями a и b из табл. 5,

$$\varphi_{\text{н}} = \frac{100}{an + b} = \frac{100}{8,684 \cdot 6,5 + 4,679} = 1,64 \text{ \%}.$$

Аналогично находим верхний концентрационный предел, учитывая, что $n < 7,5$ (см. табл. 5).

$$\varphi_{\text{в}} = \frac{100}{an + b} = \frac{100}{1,550 \cdot 6,5 + 0,560} = 9,4 \%$$

Экспериментальные значения КПП, приводимые в справочной литературе, составляют 1,86 % и 8,41 %. Сравнивая их с расчетными, убеждаемся, что для бутана расхождение расчетных и экспериментальных данных небольшое.

4.2.2. Расчет НКПР индивидуальных соединений по предельной теплоте сгорания

В соответствии с тепловой теорией, наличие пределов распространения пламени можно объяснить тем, что для распространения пламени по горючей паро- или газовой среде необходимо выделение определенного количества тепла. Экспериментально установлено, что количество тепла, выделяющееся при горении смесей с содержанием горючего, отвечающим нижнему концентрационному пределу распространения пламени (НКПР), для большинства веществ, является приблизительно величиной постоянной, равной 1830 кДж/м³. Эту величину называют предельной теплотой сгорания $Q_{\text{пр}}$. Если известно значение низшей теплоты сгорания вещества $Q_{\text{н}}$, то можно рассчитать концентрацию горючего, %, в предельной по горючести смеси, т.е. величину НКПР:

$$\varphi_{\text{н}} = \frac{Q_{\text{пр}}}{Q_{\text{н}}} 100, \quad (22)$$

Еще раз подчеркнем, что $Q_{\text{пр}}$ — это количество теплоты, выделяющееся при сгорании 1 м³ предельной смеси горючего с воздухом, а $Q_{\text{н}}$ — количество теплоты, выделяющееся при сгорании 1 м³ горючего.

Пример 1

Найти НКПР бутилена, если его низшая теплота сгорания равна 2545 кДж/моль.

Решение

Предельная теплота сгорания выражена в кДж/м³, поэтому и $Q_{\text{н}}$ необходимо выразить в кДж/м³. $22,4 \cdot 10^{-3}$

$$Q_{\text{н}} = \frac{2545}{22,4 \cdot 10^{-3}} = 113620 \text{ кДж / м}^3.$$

Так как предельная теплота сгорания 1 м³ газовой смеси в случае большинства горючих веществ приблизительно одинакова и равна 1830 кДж/м³, НКПР находим по формуле:

$$\varphi_{\text{н}} = \frac{Q_{\text{пр}}}{Q_{\text{н}}} 100 = \frac{1830 \cdot 100}{113620} = 1,6 \%$$

Экспериментально найденное значение предела составляет также 1,6%.

В табл. 6 приведены значения низшей теплоты сгорания некоторых горючих веществ

Таблица 6

Наименование вещества	Низшая теплота сгорания, кДж/м ³	Наименование вещества	Низшая теплота сгорания, кДж/м ³
Метан	35875	Пропилен	86088
Этан	63839	Бутилен	113620
Пропан	91350	Ацетилен	56092
Бутан	118761	Бензол	142561
Этилен	59104		

Значение теплоты сгорания других органических соединений можно найти в справочной литературе или рассчитать по закону Гесса.

4.2.3. Расчет концентрационных пределов распространения пламени для смеси горючих веществ

Если горючее представляет собой смесь индивидуальных веществ с известными концентрационными пределами распространения пламени, то для такой смеси можно установить значения нижнего и верхнего предела по формуле Ле-Шателье

$$\varphi_{н(в)}^{см} = \frac{1}{\sum \frac{\mu_i}{\varphi_{н(в)i}}}, \quad (23)$$

где μ_i — мольная доля i -го вещества в смеси; $\varphi_{н(в)i}$ — значение нижнего или верхнего концентрационного предела распространения пламени i -го вещества.

Эта формула справедлива для большинства смесей веществ, хотя в некоторых случаях могут наблюдаться значительные отклонения, связанные с химическим взаимодействием веществ.

Пример 1

Определить концентрационные пределы распространения пламени пропано-бутановой смеси, содержащей 60 об. % пропана и 40 об. % бутана.

Решение

Экспериментальные значения концентрационных пределов распространения пламени для компонентов смеси находим в справочной литературе [5].

для пропана $\varphi_{н} = 2,37 \%$, $\varphi_{в} = 9,5 \%$;

для бутана $\varphi_{н} = 1,86 \%$, $\varphi_{в} = 8,41 \%$.

Тогда нижний концентрационный предел распространения пламени для смеси будет равен:

$$\varphi_{н}^{см} = \frac{1}{\sum \frac{\mu_i}{\varphi_{ни}}} = \frac{1}{\frac{0,6}{2,37} + \frac{0,4}{1,86}} = 2,14 \%,$$

а верхний концентрационный предел

$$\varphi_{\text{в}}^{\text{см}} = \frac{1}{\sum \frac{\mu_i}{\varphi_{\text{в}i}}} = \frac{1}{\frac{0,6}{9,5} + \frac{0,4}{8,41}} = 9,03 \%$$

4.3. Расчет температурных пределов распространения пламени

Температурными пределами распространения пламени характеризуют пожарную опасность жидких горючих веществ. Нижний температурный предел воспламенения (НТПР) — это такая температура жидкости, при которой концентрация насыщенных паров над ее поверхностью равна нижнему концентрационному пределу распространения пламени (НКПР). Аналогично при ВТПР концентрация насыщенных паров равна ВКПР. Из этого следует, что если для горючего вещества известны концентрационные пределы распространения пламени, то по зависимости давления насыщенного пара от температуры могут быть найдены температурные пределы распространения.

Допустим, известен нижний концентрационный предел распространения пламени паров горючей жидкости. Необходимо найти НТПР, т. е. температуру, при которой концентрация насыщенных паров над поверхностью этой жидкости будет равна НКПР. По концентрации паров $\varphi_{\text{н}}$ (значение нижнего концентрационного предела распространения пламени) можно найти парциальное давление насыщенных паров:

$$P_{\text{н}} = \frac{\varphi_{\text{н}} P_0}{100}, \quad (24)$$

где P_0 — атмосферное давление (общее давление паровоздушной смеси).

По давлению насыщенного пара нетрудно установить соответствующую температуру жидкости, которая и будет значением НТПР. Зависимость давления насыщенного пара от температуры для большинства жидкостей известна и приведена в справочной литературе в виде таблиц (см. прил.), графиков или задана уравнением Антуана $\lg P = f(T)$ (прил. 7).

Температурные пределы воспламенения можно определить также по эмпирической формуле, связывающей их с температурой кипения индивидуальных жидкостей и константами K и l , характерными для данного гомологического ряда

$$T_{\text{н(в)}} = KT_{\text{кип}} - l, \quad (25)$$

где $T_{\text{н(в)}}$ — нижний или верхний температурный предел воспламенения; $T_{\text{к}}$ — температура кипения, °С.

Значение K и l приведены в приложении 10.

Пример 1

Рассчитать НТПР по нижнему концентрационному пределу распространения пламени этилового спирта. По справочнику или расчетом находим, что НКПР этилового спирта равен 3,6 %.

Решение

1. Определяем, какому давлению насыщенного пара соответствует значение нижнего концентрационного предела:

$$P_{\text{н}} = \frac{\varphi_{\text{н}} P_0}{100} = \frac{3,6 \cdot 101,3}{100} = 3,65 \text{ кПа.}$$

2. Для нахождения соответствующей температуры можно воспользоваться приложением. По зависимости давления насыщенного пара от температуры находим, что при $T_1 = 281 \text{ К}$ $P_1 = 2,67 \text{ кПа}$, а при $T_2 = 292 \text{ К}$ $P_2 = 5,33 \text{ кПа}$. Следовательно, искомая температура, отвечающая нижнему температурному пределу, находится между 281 и 292 К. Методом линейной интерполяцией находим НТПР:

$$T_{\text{н}} = T_1 + \frac{T_2 - T_1}{P_2 - P_1} (P_{\text{н}} - P_1) = 281 + \frac{292 - 281}{5,33 - 2,67} (3,65 - 2,67) = 285 \text{ К.}$$

3. Проще и точнее установить значение $T_{\text{нтпр}}$ по известной величине $P_{\text{н}}$ можно, воспользовавшись уравнением Антуана, выражающим зависимость давления насыщенного пара от температуры жидкости

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

где P , [Па]; T , [К] (см. прил. 7).

Решая уравнение относительно T , получим:

$$T = \frac{B}{A - \lg P} + C.$$

Для этилового спирта $A = 10,81$, $B = 1918$, $C = 21,1$. Подставляя численные значения, получим:

$$T = \frac{1918}{10,81 - \lg 3650} + 21,1 = 285,6 \text{ К.}$$

Пример 2

Рассчитать температурные пределы воспламенения *n*-гексана, если его температура кипения равна 341,7 К или 68,5 °С.

Решение

По прил. 10 находим константы K и ℓ для нижнего и верхнего пределов, подставляем в формулы и рассчитываем:

$$T_{\text{н}} = 0,6957 \cdot 68,5 - 73,8 = -26,1 \text{ °С} = 247,1 \text{ К};$$

$$T_{\text{в}} = 0,7874 \cdot 68,5 - 50,8 = 3,1 \text{ °С} = 276,3 \text{ К.}$$

Экспериментальные значения составляют 247 К и 277 К соответственно для нижнего и верхнего пределов.

4.4. Расчет температуры вспышки

Напомним, что температурой вспышки $T_{\text{вс}}$, [К], называется минимальная температура жидкости, при которой кратковременное воздействие источника зажигания у ее поверхности приводит к вспышке паров без последующего горения жидкости. При этой температуре скорость образования паров над поверхностью жидкости недостаточна для возникновения устойчивого горения.

Температура вспышки является основным показателем пожарной опасности жидкостей. Ее значение для некоторых жидкостей приведены в приложении.

Метод расчета этого показателя по формуле В.И. Блинова построен на предположении, что концентрации пара и кислорода в потоке, направленном к поверхности горения, отвечают стехиометрическому составу, пар к пламени подводится благодаря молекулярной диффузии, а давление пара над жидкостью связано с температурой самой жидкости. Формула имеет вид:

$$T_{\text{вс}} = \frac{A}{D_0 n P_{\text{нп}}}, \text{ К}, \quad (26)$$

где A — постоянная прибора, зависящая от условий опыта; D_0 — коэффициент диффузии, [$\text{м}^2/\text{с}$]; n — число молей кислорода, необходимое для полного сгорания одного моля пара жидкости; $P_{\text{нп}}$ — давление насыщенного пара жидкости при $T_{\text{вс}}$, [Па].

При определении $T_{\text{вс}}$ (23) имеем два неизвестных — $T_{\text{вс}}$ и $P_{\text{нп}}$, так как последняя величина должна быть взята именно при $T_{\text{вс}}$. В таком случае поступают следующим образом находят произведение

$$T_{\text{вс}} P_{\text{нп}} = \frac{A}{D_0 n}. \quad (27)$$

В дальнейшем задача сводится к тому, чтобы по известной зависимости давления насыщенных паров от температуры жидкости найти такую температуру, при которой произведение TP будет равняться найденной величине $T_{\text{вс}} P_{\text{нп}}$.

Для этого можно воспользоваться таблицей X приложения или уравнением Антуана:

$$\lg P = A - \frac{B}{T - C}, \quad (28)$$

для которого коэффициенты A , B , C приведены в прил. 7.

Формула В. И. Блинова является универсальной, по ней можно рассчитывать температуру вспышки в открытом и закрытом тигле, а также температуру воспламенения. Для этого в формуле (26) меняется только параметр A .

При определении:

температуры вспышки в закрытом тигле $A = 28 [(K \cdot \text{Па} \cdot \text{м}^2) / \text{с}]$;

температуры вспышки в открытом тигле $A = 45,3 \text{ [(К} \cdot \text{Па} \cdot \text{м}^2) / \text{с}]$;

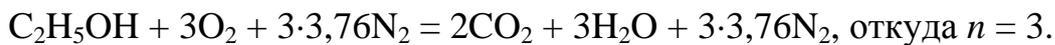
температуры воспламенения $A = 53,3 \text{ [(К} \cdot \text{Па} \cdot \text{м}^2) / \text{с}]$.

Пример 1

Вычислить температуру вспышки этилового спирта по формуле В.И. Блинова для закрытого тигля, если коэффициент диффузии паров спирта $10,2 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$. Результаты сравнить с экспериментальным значением температуры вспышки, равном 286 К.

Решение

1. Для решения задачи по формуле В. И. Блинова необходимо иметь значение коэффициента n , для чего записываем уравнение реакции горения этилового спирта:



2. Вычислим произведение

$$P_{\text{нп}} T_{\text{вс}} = \frac{A}{D_0 n}.$$

При определении $T_{\text{вс}}$ в закрытом тигле параметр $A = 28 \text{ (К} \cdot \text{Па} \cdot \text{м}^2) / \text{с}$, поэтому:

$$P_{\text{нп}} T_{\text{вс}} = \frac{28}{10,2 \cdot 10^{-6} \cdot 3} = 915033 \text{ Па} \cdot \text{К} = 915 \text{ кПа} \cdot \text{К}.$$

3. Найдем такую температуру, при которой произведение PT будет равно 915 [кПа·К]. Тогда найденное значение температуры будет соответствовать температуре вспышки.

Воспользуемся для этого зависимостью давления насыщенного пара от температуры жидкости, приведенной в приложение. Для этилового спирта при $T_1 = 281 \text{ К}$ давление паров составляет $P_1 = 2,666 \text{ кПа}$, а $P_1 T_1 = 749 \text{ кПа} \cdot \text{К}$. Это меньше, чем $P_{\text{вс}} T_{\text{вс}}$. При $T_2 = 292 \text{ К}$ давление паров $P_2 = 5,333 \text{ кПа}$, а $P_2 T_2 = 1557 \text{ кПа} \cdot \text{К}$. Это уже больше, чем $P_{\text{вс}} T_{\text{вс}}$. Это означает, что $T_{\text{вс}}$ имеет значение:

$$T_{\text{вс}} = T_1 + \frac{T_2 - T_1}{P_2 T_2 - P_1 T_1} (P_{\text{нп}} T_{\text{вс}} - P_1 T_1) = 281 + \frac{292 - 281}{1557 - 749} = 283,3 \text{ К} = 10,3 \text{ }^\circ\text{C}$$

Сравнивая полученное значение с экспериментальным (286 К), видим, что погрешность расчета по формуле В. И. Блинова составляет всего 2,7 К.

Необходимо определить погрешности следующих значений, сравнивая получившиеся теоретически со справочными данными E_Q , E_p , $E_{\text{Сн}}$, $E_{\text{СВ}}$, $E_{\text{Твс}}$, $E_{\text{Тб}}$, $E_{\text{тн}}$. Из получившихся данных составить сравнительную таблицу, после чего дать аналитическую оценку пожарной опасности вещества по предлагаемому алгоритму:

Название вещества
Структурная формула
Физико-химические свойства
Анализ показателей пожарной опасности
Средства тушения
Получение и применение

4.5. Основные параметры вещества

Группа горючести — это классификационная характеристика способности веществ и материалов к горению.

Согласно этому показателю, все материалы (вещества) можно разделить на три группы: негорючие, горючие, трудногорючие. Этот показатель характеризуется качественно и количественно. Качественная классификация основывается на способности веществ и материалов к горению при воздействии источника зажигания и после его удаления.

Негорючие (несгораемые) — вещества и материалы, не способные к горению в воздухе. Негорючие вещества и материалы могут быть пожаровзрывоопасными:

а) Окислители: перманганат калия (KMnO_4), хлор (Cl_2), перекись водорода (H_2O_2), кислород (O_2), азотная кислота (HNO_3) и др.

б) Вещества, выделяющие горючие продукты при взаимодействии друг с другом или с водой. Так, например, при взаимодействии карбида кальция (CaC_2) с водой, выделяется ацетилен (C_2H_2).

в) Вещества, реагирующие друг с другом или с водой с выделением большого количества тепла. Пример — негашеная известь (CaO).

г) Вещества, нагрев которых в герметичной емкости сопровождается значительным повышением давления и возможностью разрушения емкости. Например, сжатые или сжиженные газы, термически нестойкие соединения.

д) Вещества, способные к взрывчатым превращениям без участия кислорода воздуха. Пример — взрывчатые вещества.

Трудногорючие (трудногораемые) — вещества и материалы, способные гореть в воздухе при воздействии источника зажигания, но не способные самостоятельно гореть после его удаления (продемонстрировать опыт), (привести пример с требованиями к электроизоляции, отделочным материалам).

Трудногорючие вещества могут гореть в зоне пожара, увеличивая пожарную нагрузку помещений.

Горючие (сгораемые) — вещества и материалы, способные самовозгораться, а так же возгораться при воздействии источника зажигания и самостоятельно гореть после его удаления.

Горючие жидкости с температурой вспышки не более $61\text{ }^\circ\text{C}$ в закрытом сосуде (тигле) или $66\text{ }^\circ\text{C}$ в открытом тигле, зафлегматизированных смесей, не имеющих вспышку в закрытом тигле, относят к легковоспламеняющимся (ЛВЖ). Особо опасными называют ЛВЖ с температурой вспышки не более $28\text{ }^\circ\text{C}$.

Группа горючести является важнейшим параметром пожарной опасности и применяется при классификации веществ и материалов по степени пожарной опасности в соответствии с действующими противопожарными нормами.

Группу горючести веществ и материалов можно определить экспериментально или расчетным путем. Но об этом мы с вами будем говорить во втором вопросе нашей лекции. А сейчас я хочу сказать о том, что если нет возможности таких экспериментальных исследований или расчетов, то группу горючести газов и жидкостей можно определить косвенно по другим экспериментально определенным показателям пожаровзрывоопасности.

ГАЗЫ:

1. Горючий — наличие КПП.
2. Трудногорючий — отсутствие КПП и наличие температуры самовоспламенения.
3. Негорючий — отсутствие КПП и температуры самовоспламенения.

ЖИДКОСТИ:

1. Горючая — наличие температуры воспламенения.
2. Трудногорючая — отсутствие температуры воспламенения и наличие температуры самовоспламенения.
3. Негорючая — отсутствие температуры вспышки, воспламенения, самовоспламенения, ТПП и КПП.

Такую классификацию веществ и материалов по группам горючести дает нам ГОСТ 12.1.044—89. Данная классификация распространяется абсолютно на все вещества, находящиеся в природе и которые нас окружают. Почему многие на этом заостряют внимание? Потому что СНиП 21-01—97* «Пожарная безопасность зданий и сооружений» дает нам несколько иную классификацию строительных материалов по горючести. Более подробно этот вопрос изучают на дисциплине «Здания, сооружения и их поведение в условиях пожара».

Пожарная опасность строительных материалов определяется следующими пожарно-техническими характеристиками: горючестью, воспламеняемостью, распространением пламени по поверхности, дымообразующей способностью и токсичностью (СНиП 21-01—97*).

Строительные материалы подразделяются на негорючие (НГ) и горючие (Г). Горючие строительные материалы подразделяются на четыре группы:

- Г1 (слабогорючие);
- Г2 (умеренногорючие);
- Г3 (нормальногорючие);
- Г4 (сильногорючие).

Горючесть и группы строительных материалов по горючести устанавливают по ГОСТ 30244-94 «Материалы строительные. Методы испытания на горючесть».

Для негорючих строительных материалов другие показатели пожарной опасности не определяются и не нормируются.

Для определения динамики развития пожара и проведения расчетов необходимо учитывать следующие характеристики:

Температура вспышки (ГОСТ 12.1.004-76);

Температура самовоспламенения. По температуре самовоспламенения необходимо рассчитать безопасно допустимую температуру нагрева стенки технологического оборудования по следующей формуле (ГОСТ 12.1.044—89):

$$t_{\text{без}} \leq 0,8 \cdot T_{\text{СВ}}; \quad (29)$$

НКПР (ВКПР) и НТПР (ВТПР). Находим безопасные и пожароопасные области (см. ниже).

Например, если $\varphi_{\text{н}} = 1,14$ % об. $\varphi_{\text{в}} = 7,22$, то



где БО = Безопасная область; ВПО = Взрывоопасная область; ПВПО = Потенциально взрывопожароопасная область; Нормальная скорость распространения пламени;

Минимальная энергия зажигания

Скорость выгорания. Значение $V_{\text{н}}$ показывает сколько выгорает горючего вещества с площади 1 м^2 за 1 сек. По $V_{\text{н}}$ и плотности ρ можно определить линейную скорость выгорания V_{λ} :

$$V_{\lambda} = V_{\text{н}}/\rho. \quad (30)$$

Минимальное взрывоопасное содержание кислорода и минимальная флегматизирующая концентрация флегматизатора. МВСК показывает минимальную концентрацию кислорода, при которой еще возможно горение.

Максимальное давление взрыва $P_{\text{взр}}$.

4.6. Огнетушащие вещества

Огнетушащие вещества принято разделять по преобладающему механизму огнетушащего действия на четыре группы: разбавляющие, химически активные ингибиторы, изолирующие, охлаждающие. Следует иметь в виду, что каждое огнетушащее вещество обладает комплексом механизмов воздействия на процесс горения и горючий материал. В зависимости от вида горючего, способа применения и ряда других факторов одно и то же огнетушащее вещество может оказаться в разных группах данной классификации.

А). *Негорючие газы*. Попадая в зону горения, они разбавляют горючую смесь, т.е. уменьшают концентрацию горючего и окислителя $\varphi_{\text{г}}$ и $\varphi_{\text{ок}}$. В результате уменьшения числа эффективных соударений это приводит к снижению интенсивности тепловыделения. Поэтому негорючие газы составляют группу разбавляющих огнетушащих веществ. Вместе с тем, поступая в зону горения, они имеют начальную температуру, равную температуре окружаю-

щей среды. Следовательно, при их подаче в зону горения неизбежно возрастает интенсивность теплоотвода за счет увеличения коэффициента теплопередачи.

Б). *Химически активные ингибиторы (ХАИ)*. С их помощью происходит повышение энергии активации и уменьшение константы скорости химической реакции. В результате этого снижается интенсивность тепловыделения. Вместе с тем ХАИ обладают большой теплоемкостью и при их подаче в зону горения происходит также охлаждение пламени, значительно более интенсивное, чем при тушении негорючими газами. Причем, по некоторым данным, эффект охлаждения может быть соизмерим с эффектом ингибирования. В результате такого комплексного воздействия ХАИ во всех случаях более эффективны, чем негорючие газы.

В). *Пены*. Они применяются главным образом для тушения пожаров жидкостей. В этом случае преобладающий механизм тушения заключается в том, что пена, постепенно закрывая поверхность жидкости, уменьшает количество паров, поступающих в зону горения. В результате уменьшаются их концентрация φ_r , интенсивность тепловыделения q^+ , снижается температура пламени и соответственно лучистый тепловой поток, который определяет интенсивность испарения жидкости. Когда слой пены достигает определенной толщины (зависящей от вида пенообразователя и горячей жидкости) интенсивность тепловыделения в зоне горения уменьшается настолько, что температура пламени снижается до температуры потухания.

Г). *Вода*. С помощью воды прекращения горения достигают, охлаждая как зону горения, так и горящий материал. При тушении пожаров горючих газов водой тепло отводят только от зоны горения, так как газы воспламеняются при любой собственной температуре и охлаждать их перед зоной горения бесполезно.

Д). *Порошки*. При их использовании в той или иной мере реализуются все перечисленные выше механизмы (разбавление, ингибирование, изолирование, охлаждение и экранирование) одновременно. Кроме того, частицы порошка разбивают объем зоны горения на множество ячеек. В результате площадь теплоотвода становится равной суммарной площади поверхности частиц, что само по себе уже приводит к резкому увеличению q^- . С увеличением объемной концентрации порошка расстояние между частицами уменьшается и становится равным критическому размеру, в котором пламя существовать не может, так как $q^- \gg q^+$. В этом заключается так называемый эффект объемной сетки.

5. ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ РАЗВИТИЯ ПОЖАРА НА ОБЪЕКТЕ

Динамикой любого процесса, в том числе пожара, называется зависимость его параметров от времени. Знание закономерностей изменения параметров пожара необходимо для обеспечения безопасности людей, разработки мер по предотвращению распространения пожаров, для проектирования систем автоматического обнаружения и тушения, планирования сил и средств, необходимых при ликвидации пожаров.

Непосредственной причиной возникновения процесса горения и, следовательно, пожара является источник зажигания. Им может быть в принципе любой источник тепла достаточной мощности (бытовой кипятильник, рефлектор и т.д.). Во многих случаях пожар начинается с прогрева локального участка поверхности горючего материала и образования над ним горючей смеси, которая затем воспламеняется. Лучистый тепловой поток от образовавшегося факела нагревает соседние участки поверхности, вызывая образование и воспламенение над ними горючей смеси, т.е. начинается процесс распространения пламени по поверхности, увеличение площади пожара. С ростом площади пожара увеличивается объем зоны горения и, соответственно, площадь излучения, конвективные потоки. Все это приводит к повышению среднеобъемной температуры и, как следствие, температуры всех предметов и материалов, находящихся в помещении. В свою очередь, рост температуры материалов сопровождается увеличением линейной скорости распространения фронта пламени.

Если помещение имеет большой свободный объем (обычно более 1000 м³) или большие открытые проемы, процесс распространения пожара протекает путем постепенного охвата пламенем предметов (изделий, материалов) одного за другим. В помещениях меньшего объема при достижении среднеобъемной температуры 300-350 °С и наличии воздуха содержание газообразных продуктов пиролиза достигает нижнего концентрационного предела распространения пламени. В этом случае скорость распространения пламени достигает максимального значения, поскольку процесс происходит уже не по поверхности, а по объему газовой среды. Скорость распространения пламени по газу составляет от нескольких метров до сотен метров в секунду в зависимости от состава газа. Внешне это воспринимается как объемная вспышка, т. е. одновременное воспламенение всех горючих материалов,

которые находятся в помещении. В результате свободный объем помещения превращается в зону горения (объемный пожар). Обычно это сопровождается разрушением остекления проемов вследствие резкого нарастания давления. Соответственно в помещение начинает поступать свежий воздух.

Если свободный объем помещения мал, то при объемном пожаре быстро расходуется запас кислорода, массовая скорость выгорания и, соответственно, интенсивность тепловыделения начинают постепенно уменьшаться. Температура также снижается. В герметичном помещении может произойти самопроизвольное затухание пожара. Однако на практике такое бывает редко. Как правило, всегда есть приток воздуха через неплотно закрытые проемы, щели, а температура газовой среды в помещении успевает достичь температуры воспламенения горючих материалов. Поэтому через какое-то время, в зависимости от скорости притока воздуха, в помещении создается горючая смесь продуктов пиролиза с воздухом и горение интенсифицируется.

Если во время “затухания” обеспечить доступ воздуха в помещение (например, открыв дверь), произойдет мгновенное образование и воспламенение горючей смеси. А поскольку объем продуктов сгорания больше объема исходной смеси, в помещении резко возрастет давление и произойдет выброс нагретых газов. Такая вспышка может быть причиной травмирования или гибели пожарных при тушении пожаров в подвалах, банях-саунах, гаражах, холодильниках. Данная стадия пожара, в течение которой продолжается распространение фронта пламени, называется начальной.

После того как рост площади пожара в данном помещении прекращается, начинается вторая стадия — стадия развития, во время которой, при наличии достаточного притока воздуха, увеличивается скорость выгорания горючих веществ, теплота пожара, растет температура газовой среды. В конце этой стадии прекращается изменение параметров процессов тепло- и газообмена, температура достигает максимального значения и начинается третья стадия пожара — стационарная. При свободном развитии пожара горючие материалы постепенно выгорают, и пожар переходит в стадию затухания.

5.1. Расчет динамики развития площади пожара, построение графика и плана развития пожара

При расчете площади пожара принимается ряд допущений.

Первое: пожарная нагрузка в помещении распределена равномерно по всей площади пола. Это означает, что распространение фронта пламени происходит непрерывно.

Второе: фронт пламени распространяется обязательно во все стороны и с одинаковой скоростью. Следовательно, площадь пожара может иметь только форму круга, полукруга, четверти круга, сектора, прямоугольника или квадрата.

Третье: в первые 10 минут свободного развития пожара линейная скорость распространения фронта пламени $v_{л}$ равна половине значения, указанного в таблице для соответствующего помещения. Т.е. при $\tau \leq 10$ мин $v_{л} = 0,5v_{л}^{табл}$; при $\tau > 10$ мин $v_{л} = v_{л}^{табл}$.

Четвертое: когда фронт пламени достигает ограждающей конструкции, его форма сразу становится прямоугольной.

Таким образом, площадь пожара $F_{п}$ рассчитывается по следующим основным формулам (рис. 1).

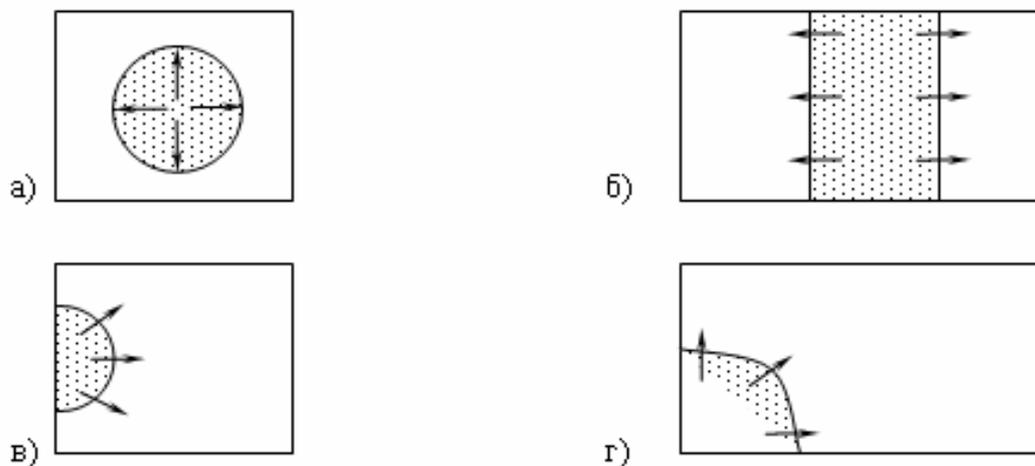


Рис. 1. Возможные формы развития пожара

Определяемая	Форма площади пожара		
	круговая	угловая	прямоугольная
Площадь пожара	$S_{п} = \pi R^2$ $S_{п} = 0,785 D^2$	$S_{п} = 0,5 \alpha R^2$	$S_{п} = ab$ При развитии в двух направлениях $S_{п} = a(b_1 + b_2)$

Учитывая, что в начальной стадии развития пожара (длительность которой принимается равной 10 мин) $v_{л} = 0,5v_{л}^{табл}$ (м/мин), путь, пройденный фронтом пламени к моменту τ , будет равен:

$$L_{\tau} = 0,5v_{л}^{табл} \text{ при } \tau \leq 10 \text{ мин};$$

$$L_{\tau} = L_{10} + L_{\tau-10} \text{ при } \tau > 10 \text{ мин.}$$

Здесь: L_{10} — путь, который проходит фронт пламени за первые 10 мин;

$$L_{10} = 0,5v_{л}^{табл} \cdot 10 = 5v_{л}^{табл}, [\text{м}];$$

$L_{\tau-10}$ — путь, который проходит фронт пламени за оставшееся после 10 мин время ($\tau - 10$):

$$L_{\tau-10} = v_{л}^{табл}(\tau - 10), [\text{м}], \text{ тогда при } \tau > 10 \text{ мин}$$

$$L = 5v_{л}^{табл} + v_{л}^{табл}(\tau - 10), [\text{м}].$$

Расчет площади пожара на заданный момент времени целесообразно проводить в следующей последовательности:

найти L_τ ;

по плану помещения установить, где будет находиться фронт пламени; учитывая, что при достижении ограждающих конструкций фронт пламени спрямляется, определить форму полученной геометрической фигуры; найти площадь пожара.

Графиком развития пожара называется зависимость его площади от времени. Его необходимо построить для моментов времени, указанных в задании.

Пример 1

Рассчитать площадь пожара на 5-й, 15-й и 20-й минутах с момента его возникновения (рис. 2), если скорость распространения равна 1,2 м/мин, а предел огнестойкости двери — 0,2 м.

Решение

1. Поскольку пожар возник возле двери, отсчет предела ее огнестойкости начнется сразу. Тогда в правое помещение пламя проникнет через $0,2 \cdot 60 = 12$ мин с момента возникновения пожара. До 12-й минуты пожар будет распространяться только в одном помещении.

2. За 5 минут фронт пламени пройдет расстояние $L_5 = 0,5 \cdot 1,2 \cdot 5 = 3$ м. До ближайших боковых стен — 8 м. Следовательно, фронт пламени на 5-й минуте будет иметь форму полукруга и $F_{\text{п}}^5 = 3,14 \cdot 3^2 / 2 = 14 \text{ м}^2$ (рис. 3).

3. За 15 минут фронт пламени может пройти расстояние

$$L_{15} = 5 \cdot 1,2 + 1,2 (15 - 10) = 12 \text{ м.}$$

К этому времени в левом помещении он уже достигнет боковых стен и примет форму прямоугольника размером 16×12 м.

В смежном помещении он будет распространяться всего $15 - 12 = 3$ мин (причем скорость его равна $v_{\text{д}}^{\text{табл}}$, так как $\tau > 10$ мин).

За это время он пройдет расстояние $1,2 \cdot 3 = 3,6$ м. Следовательно, в смежном помещении фронт пламени имеет форму полукруга и площадь, равную $\pi \cdot 3,6^2 / 2 = 20 \text{ м}^2$. Общая площадь пожара на 15-й минуте:

$$F_{\text{п}}^{15} = 16 \cdot 12 + 20 = 212 \text{ м}^2.$$

4. К 20-й минуте фронт пламени может пройти $L_{20} = 5 \cdot 1,2 + 1,2(20 - 10) = 18$ м. Тогда все левое помещение к этому моменту времени будет охвачено пожаром (см. рис. 6). Однако в правом помещении он будет распространяться $20 - 12 = 8$ мин. За это время он пройдет $1,2 \cdot 8 = 9,6$ м и, достигнув боковых стен, примет форму прямоугольника размером $16 \times 9,6$ м. В результате:

$$F_{\text{п}}^{20} = 16 \cdot 18 + 16 \cdot 9,6 = 321,37 \text{ м}^2 \approx 322 \text{ м}^2.$$

Таким образом, $F_{\text{п}}^5 = 14 \text{ м}^2$; $F_{\text{п}}^{15} = 212 \text{ м}^2$; $F_{\text{п}}^{20} = 322 \text{ м}^2$. По этим данным строим зависимость $F_{\text{п}} = f(\tau)$, которая называется графиком развития пожара.

Находим общую площадь проемов, участвующих в газообмене, и площадь проемов, работающих на приток воздуха. После чего определить коэффициент избытка воздуха λ на всех указанных в задании промежутках

времени, учитывая, что $V_b^p = 4,2 \text{ м}^3/\text{кг}$ — для древесины. Из полученных данных составить таблицу.

5.2. Тепловой баланс внутреннего пожара

Под температурой внутреннего пожара понимается среднеобъемная температура газовой среды в помещении в данный момент времени. Она определяется соотношением количества тепла, выделенного в результате горения и удаляемого из помещения. Если бы отсутствовал теплообмен очага пожара с окружающей средой, ограждающими конструкциями, то максимальная температура, как и на открытом пожаре, достигала бы температуры пламени приблизительно $1150 \text{ }^\circ\text{C}$ для твердых горючих материалов, примерно $1250 \text{ }^\circ\text{C}$ для жидкостей и $1350 \text{ }^\circ\text{C}$ для газов.

В общем виде тепловой баланс внутреннего пожара в каждый момент времени может быть представлен следующим уравнением:

$$q_{\text{п}} = q_{\text{уд}} + q_{\text{ср}} + q_{\text{к}} + q_{\text{луч}}, \quad (31)$$

где $q_{\text{п}}$ — интенсивность выделения тепла (теплота пожара); $q_{\text{уд}}$ — интенсивность удаления тепла из помещения вместе с продуктами горения; $q_{\text{ср}}$ — интенсивность накопления тепла газовой средой внутри помещения; $q_{\text{к}}$ — интенсивность поглощения тепла ограждающими конструкциями; $q_{\text{луч}}$ — интенсивность излучения тепла за пределы помещения через проемы.

Все величины, входящие в это уравнение, изменяются во времени. Они зависят от вида горючего материала, его количества, характеристик помещения и строительных материалов и многих других факторов. Например, $q_{\text{к}}$ на стационарной стадии развития пожара может достигать 50% от $q_{\text{п}}$. В целом потери тепла изменяются от 10 до 80 % $q_{\text{п}}$ в зависимости от условий газообмена и продолжительности горения

Из всех составляющих $q_{\text{п}}$, входящих в уравнение (31), только $q_{\text{ср}}$ непосредственно затрачивается на развитие пожара внутри данного помещения. Однако нельзя сказать, что остальные составляющие не представляют пожарной опасности. Величина $q_{\text{луч}}$ определяет возможность распространения пожара на соседние объекты, представляет опасность для личного состава при тушении, приводит к повышению температуры строительных конструкций, снижает их несущую способность и создает угрозу обрушения. Тепло, удаляемое из помещения с продуктами горения, способствует распространению пожара на верхние этажи здания.

Таким образом, только величина $q_{\text{ср}}$ определяет в конечном счете температуру внутреннего пожара. Уравнение теплового баланса используется как для анализа пожара, так и для расчета среднеобъемной температуры.

Рассчитать тепловой поток на 10, 15, 20, 25, 30 и 35 минутах (данные оформляются в виде таблицы).

$$Q = \frac{xV'_m F_n Q_n}{F_{\text{огр}}} \text{ [КВТ/м}^2\text{]}. \quad (32)$$

5.3. Расчет динамики изменения высоты нейтральной зоны во времени и построение графика

Физической природой газообмена при пожаре в помещении является разность давлений газовой среды внутри помещения и воздуха снаружи. По мере накопления газообразных продуктов горения и повышения среднеобъемной температуры давление газовой среды в помещении начинает изменяться относительно давления воздуха снаружи. В верхней части помещения давление становится несколько больше атмосферного, в нижней части — меньше, и на какой-то высоте h_0 — равным атмосферному. Горизонтальная плоскость, расположенная на высоте h_0 , на которой давление газов внутри помещения и воздуха снаружи равны, называется плоскостью равных давлений (ПРД). Она делит помещение на две части. Ниже ПРД в помещение через проемы поступает воздух, выше — из помещения выходят нагретые газы.

В зависимости от соотношения массы горючих материалов и количества воздуха, которое обеспечивает их сгорание, пожар на третьей стадии может протекать в двух режимах. В тех случаях, когда приток воздуха достаточен для достижения максимальной полноты сгорания, обусловленной видом горючего материала, массовая скорость выгорания не зависит от изменения интенсивности газообмена. А поскольку теплота пожара — q_n (т. е. интенсивность тепловыделения) прямо пропорциональна массовой скорости выгорания, она также не зависит от изменения интенсивности газообмена и определяется только видом горючего материала и плотностью его укладки (если это твердый горючий материал). Такие пожары называются регулируемыми нагрузкой (ПРН).

При свободном развитии пожара в таком режиме уровень интенсивности газообмена помещения с окружающей средой устанавливается в соответствии с массовой скоростью выгорания, т.е. массовой скоростью образования продуктов горения. Если в такой ситуации искусственно увеличить приток воздуха, подавая его с помощью вентилятора (дымососа), произойдет снижение температуры газовой среды в помещении, так как наружный воздух является значительно более холодным. Если при режиме ПРН вскрыть дополнительно один или несколько проемов или удалять продукты горения с помощью дымососа, среднеобъемная температура также понизится. В этом случае возрастает количество тепла, удаляемого вместе с продуктами горения $q_{уд}$. А так как q_n при ПРН не изменится, тепловой баланс будет восстанавливаться за счет уменьшения других составляющих: $q_{ср}$ и q_k (34).

В тех случаях, когда интенсивность газообмена ограничивает массовую скорость выгорания, т.е. приток воздуха в помещение не обеспечивает максимальную полноту сгорания горючих материалов, пожар называется регулируемым вентиляцией (ПРВ). Очевидно, что увеличение притока воздуха при ПРВ вызовет рост массовой скорости выгорания, интенсивности тепловыделения и соответственно температуры газовой среды в помещении.

Пример 1

Произвести расчет динамики изменения высоты нейтральной зоны на 25 и 20 минутах и построить график изменения высоты ПРД от времени. Если известно, что размеры окон $1,7 \times 2,9$ и расстояние от пола до подоконника 1,2 м.

Решение

1. Определим высоту нейтральной зоны на 20, 25, 30, 35 минутах:

$T_n^{20} = 240^\circ\text{C}$, значит, ρ_{nz}^{20} определяем методом линейной интерполяции:

$$\begin{aligned}\rho_{nr}^{20} &= a_r = a_1 + \frac{(e_x - e_1)(a_2 - a_1)}{b_2 - b_1} = \\ &= 0,748 + \frac{(240 - 200)(0,617 - 0,748)}{300 - 200} = 0,696 \text{ кг/м}^3\end{aligned}$$

$T_n^{25} = 200^\circ\text{C}$, значит, $\rho_{nz}^{25} = 0,748 \text{ кг/м}^3$

$T_n^{30} = 400^\circ\text{C}$, значит, $\rho_{nz}^{30} = 0,525 \text{ кг/м}^3$

$T_n^{35} = 425^\circ\text{C}$, значит, ρ_{nz}^{35} определяем методом линейной интерполяции:

$$\rho_{nz}^{25} = 0,525 + \frac{(425 - 400)(0,457 - 0,525)}{500 - 400} = 0,508 \text{ кг/м}^3$$

$$h_0 = \frac{H_{nz}}{1 + \sqrt[3]{\rho_B / \rho_{nz}}} + H_n. \quad (33)$$

$$h_0^{20} = \frac{2,9}{1 + \sqrt[3]{1,29 / 0,696}} + 1,2 = 2,4 \text{ м.}$$

$$h_0^{25} = \frac{2,9}{1 + \sqrt[3]{1,29 / 0,748}} + 1,2 = 2,52 \text{ м.}$$

$$h_0^{30} = \frac{2,9}{1 + \sqrt[3]{1,29 / 0,525}} + 1,2 = 2,43 \text{ м.}$$

$$h_0^{35} = \frac{2,9}{1 + \sqrt[3]{1,29 / 0,508}} + 1,2 = 2,42 \text{ м.}$$

2. Построим график зависимости изменения высоты нейтральной зоны от времени:

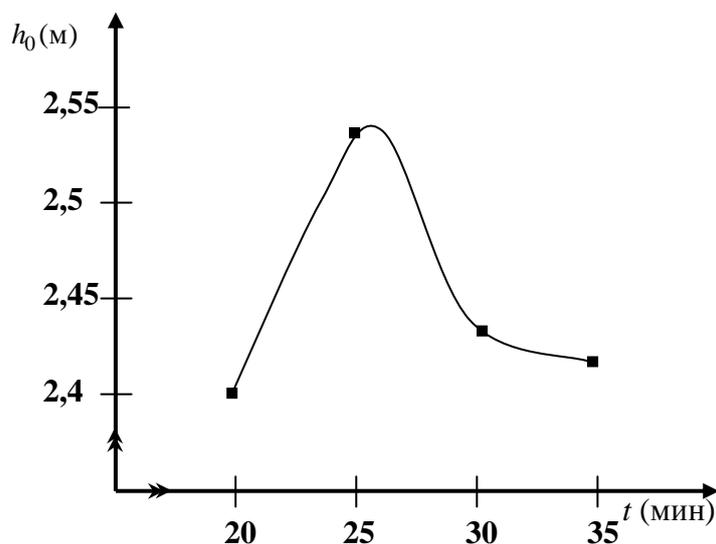


Рис. 4. График изменения высоты ПРД от времени

5.4. Расчет динамики измерения фактической интенсивности газообмена во времени

Основными параметрами газообмена на пожаре являются интенсивность газообмена (J_{Γ}) и коэффициент избытка воздуха (α). Интенсивность газообмена характеризует скорость поступления воздуха в помещение в расчете на 1 м^2 площади пожара. Она равна отношению расхода воздуха, проходящего через проемы $G_{\text{в}}$, кг/с, к площади пожара ($F_{\text{п}}$): $J_{\Gamma} = G_{\text{в}}/F_{\text{п}}$, кг/(с·м²).

Коэффициент избытка воздуха определяет количество воздуха, поступающего в помещение по отношению к требуемому для сгорания горючего вещества: $\alpha = G_{\text{в}}/G_{\text{в}}^{\text{треб}}$. Он определяет среднеобъемную концентрацию кислорода $\varphi_{\text{O}_2}^{\text{сп}}$ в помещении в данный момент времени.

Расход воздуха, фактически поступающего в помещение и требуемого находят по формулам соответственно:

$$G_{\text{в}} = (2/3)\mu B h_0 \sqrt{2gh_0\rho_{\text{в}}(\rho_{\text{в}} - \rho_{\Gamma})}, \quad (34)$$

$$G_{\text{в}}^{\text{треб}} = v_{\text{м}}' F_{\text{п}} V_{\text{в}}^0 \rho_{\text{в}}, \quad (35)$$

где μ — средний коэффициент сопротивления проема, $\mu = 0,65$; B — суммарная ширина открытых проемов, [м]; h_0 — высота плоскости равных давлений, [м]; $g = 9,8$ — ускорение свободного падения, [м/с²]; $\rho_{\text{в}}$ — плотность воздуха, $\rho_{\text{в}} = 1,2$ [кг/м³]; ρ_{Γ} — плотность дымовых газов при температуре пожара, кг/м³; $V_{\text{в}}^0$ — объем воздуха, теоретически необходимый для полного сгорания 1 кг горючего, м³/кг.

Во время свободного развития пожара коэффициент избытка воздуха изменяется. Вначале, пока $v_{\text{м}}$ мала и $G_{\text{в}}^{\text{треб}}$ невелик, проемы практически не лимитируют приток воздуха в помещение. Коэффициент α в этом случае может составлять 40 и более. По мере увеличения $v_{\text{м}}$ возрастает $G_{\text{в}}^{\text{треб}}$, а пропускная способность проемов уменьшается вследствие снижения h_0 . Как по-

казывают эксперименты, коэффициент избытка воздуха уменьшается до некоторого минимального значения, затем остается постоянным и при снижении v_m , вследствие выгорания материала, возрастает.

Соответственно изменяется и среднеобъемная концентрация кислорода в помещении. Если в ходе уменьшения α она понизится до некоторого значения $\varphi_{O_2}^{np}$, предельного для данного горючего, пламенное горение постепенно прекратится. Если среднеобъемная температура при этом была ниже температуры воспламенения горючих веществ, находящихся в помещении (для твердых горючих материалов 300°C), возможно самозатухание пожара. Если среднеобъемная температура была выше температуры воспламенения, постепенное прекращение пламенного горения вызовет уменьшение массовой скорости выгорания и, соответственно, требуемого расхода воздуха. В результате этого наступит момент, когда α и $\varphi_{O_2}^{cp}$ начнут возрастать. Когда $\varphi_{O_2}^{cp}$ станет больше $\varphi_{O_2}^{np}$, пламенное горение возобновится. В случае такого развития пожара, при вскрытии дополнительных проемов, существует опасность объемной вспышки.

Если $\varphi_{O_2}^{cp} > \varphi_{O_2}^{np}$, пожар будет продолжаться до полного прекращения горения в результате тушения или выгорания пожарной нагрузки.

Экспериментально установлено, что $\varphi_{O_2}^{cp}$, об. %, связана с концентрацией кислорода в выходящих газах $\varphi_{O_2}^r$ формулой:

$$\varphi_{O_2}^{cp} = (\varphi_{O_2}^r + 10,12) / 1,44, \quad (36)$$

Концентрацию кислорода в выходящих газах можно определить из выражения

$$\alpha = \frac{21}{21 - \varphi_{O_2}^r}. \quad (37)$$

При наличии газообмена с окружающей средой α равен:

$$\alpha = \frac{G_B}{G_B^{треб}} = \frac{(2/3)\mu B h_0 \sqrt{2gh_0\rho_B(\rho_B - \rho_r)}}{v_m' F_{\Pi} V_B^0 \rho_B}. \quad (38)$$

Величину h_0 , м, при газообмене через один проем или несколько проемов, расположенных на одинаковом расстоянии от пола, рассчитывают по формуле:

$$h_0 = \frac{H}{1 + \sqrt[3]{\rho_B / \rho_r}}, \quad (39)$$

где H — высота проема, м.

Если газообмен осуществляется через несколько проемов, расположенных на разных уровнях (рис. 5), вместо h_0 в расчетные формулы подставляют средневзвешенную величину h_1 .

Обозначим $F_{\text{пр1}}, F_{\text{пр2}}, F_{\text{пр3}}$ общую площадь каждого проема, а F'_1, F''_1, F'''_1 — части проемов, работающие на приток воздуха. Тогда общая площадь проемов, участвующих в газообмене, равна:

$$\sum F_{\text{пр}} = F_{\text{пр1}} + F_{\text{пр2}} + F_{\text{пр3}}. \quad (40)$$

Предположим, что процесс газообмена установился. Тогда общая площадь проемов, работающая на приток воздуха, приближенно равна:

$$\begin{aligned} \sum F_1 &= 1/3 \sum F_{\text{пр}}. \\ \sum F_1 &= h_0 d_1 + (h_0 - a) d_2 + (h_0 - b) d_3, \end{aligned} \quad (41)$$

где d_1, d_2 и d_3 — ширина соответствующего проема, м; a, b — нижние отметки проемов (см. рис. 7).

Из этого уравнения находим h_0 , а затем (см. рис.7) h'_1, h''_1 и h'''_1 :

$$h'_1 = h_0/2; h''_1 = (h_0 - a)/2; h'''_1 = (h_0 - b)/2,$$

где h'_1, h''_1 и h'''_1 — расстояния от центров приточных частей проемов до плоскости равных давлений, [м].

Значение h_1 берется как средневзвешенная величина

$$h_1 = \frac{h'_1 F'_1 + h''_1 F''_1 + h'''_1 F'''_1}{F'_1 + F''_1 + F'''_1}, \quad (42)$$

где $F_1 = h_0 d_1; F_1 = (h_0 - a) d_2; F_1 = (h_0 - b) d_3$.

Пример 1

При пожаре в помещении воздух поступает через проем размерами 0,4x1,9 м. Площадь пожара к данному моменту времени составляет 5 м², температура пожара 450 °С, средний элементный состав твердого горючего вещества: С = 40 %, Н = 4 %, О = 10 %, N = 16 %, влага W = 15 %, зола = 15 %; $v'_m = 0,44$ кг/(м²·мин). Для данного вещества $\phi_{O_2}^{\text{пр}} = 15$ %. Рассчитать параметры газообмена и сделать выводы о возможном развитии пожара.

Решение

Для определения параметров газообмена необходимо, прежде всего рассчитать h_0 и V_B^0 . Величину μ принимаем равной 0,65, ρ_B — 1,2 кг/м³; ρ_r находится в зависимости от температуры пожара по графику. В данном случае $\rho_r = 0,475$ кг/м³.

1. Находим h_0

$$h_0 = \frac{1,9}{1 + \sqrt[3]{1,2 / 0,475}} = 0,8 \text{ м.}$$

2. Рассчитываем V_B^0 . Поскольку задано вещество сложного состава, расчет проводим по формуле

$$V_B^0 = 0,267 \cdot \left(\frac{C}{3} + H + \frac{S-O}{8} \right) = 0,267 \left(\frac{40}{3} + 4 + \frac{10}{8} \right) = 4,29 \text{ м}^3 / \text{кг}.$$

3. Учитывая, что $v'_m = 0,44 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{мин}) = 0,44/60 = 0,0073 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$.

С помощью формул (37) и (38) определяем коэффициент избытка воздуха:

$$\alpha = \frac{2/3 \cdot 0,65 \cdot 0,4 \cdot 0,8 \sqrt{2 \cdot 9,8 \cdot 0,8 \cdot 1,2 \cdot (1,2 - 0,475)}}{0,0073 \cdot 5 \cdot 4,2 \cdot 1,2} = 2,8.$$

4. Из выражения (36) находим $\varphi_{O_2}^r$:

$$\varphi_{O_2}^r = 21(\alpha - 1) / \alpha = 21 \cdot 1,8 / 2,8 = 13,5 \text{ \%}.$$

5. По формуле (39) определяем $\varphi_{O_2}^{cp}$:

$$\varphi_{O_2}^{cp} = (\varphi_{O_2}^r + 10,12) / 1,44 = (13,5 + 10,12) / 1,44 \approx 16 \text{ \%}.$$

6. СОДЕРЖАНИЕ ВЫВОДОВ ПО РАБОТЕ

В данной главе обучаемый описывает проведенные им расчеты, основываясь на которых он делает определенные выводы по проведенной работе.

Исходя из задания на выполнение курсовой работы студент должен определить тип исследуемого здания, какую скорость распространения пламени он использовал.

Необходимо указать на каком этапе (промежутке времени) какая форма распространения пламени преобладала и почему. На какой минуте выгорают двери, с какого времени в газообмене начинают участвовать оконные проемы (нужно указать объем площади, работающей на приток воздуха, фактическую и требуемую интенсивность газообмена на этот промежуток). Обратить особое внимание на то, когда пожар начинает распространяться в соседних помещениях, имеются ли перепады давления и температуры пожара.

В конце необходимо дать общую оценку возможности тушения автоматической установкой пожаротушения в заданном помещении.

Образец выполнения титульного листа

Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет

Кафедра «Пожарная безопасность и защита в чрезвычайных ситуациях»

Дисциплина: «Теория горения и взрыва»

РАСЧЕТНО-ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА
к курсовой работе

по теме: «Прогнозирование пожаровзрывоопасности и динамики развития пожара на объекте»

Разработал студент __уч. группы

_____ (звание, фамилия, инициалы)

Дата выдачи задания: _____

Срок сдачи работы: _____

Курсовая работа принята

"__" _____ 20__ г.

с оценкой _____

Преподаватель _____

Волгоград 20__

Список принятых обозначений

- n — число молей вещества
 P — давление газа, Па
 T — температура вещества, К
 Q — количество теплоты, Дж
 V_i — объем i -го газообразного вещества, м³, кмоль
 α — коэффициент избытка воздуха
 $T_{св}$ — температура самовоспламенения, К
 q^+ — скорость тепловыделения, кДж/с
 q^- — скорость теплоотвода, кДж/с
 $T_{всп}$ — температура вспышки, К
 m — масса вещества, кг
 M — масса одного кмолья вещества, кг/кмоль
 V_v — теоретическое количество воздуха, необходимое для горения, кмоль/кмоль, м³/кг
 Q_H — низшая теплота сгорания вещества, кДж/моль, кДж/кг
 H_i — энтальпия i -го вещества, кДж/моль, кДж/м³
 T_r — температура горения, К
 C_{p_i} — теплоемкость i -го газа при постоянном давлении, кДж/(моль·К), кДж/(м³·К)
 η — коэффициент теплопотерь
 $\varphi_{н(в)}$ — нижний (верхний) концентрационный предел распространения пламени, об. %
 μ_i — мольная доля i -го вещества
 $T_{н(в)}$ — нижний (верхний) температурный предел воспламенения, К
 M_p — число концевых функциональных групп
 ℓ_i — длина i -й углеродной цепи
 $q_{п}$ — теплота пожара, кВт
 $q_{уд}$ — интенсивность удаления тепла из помещения вместе с продуктами горения, кВт
 $q_{ср}$ — интенсивность накопления тепла газовой средой в помещении, кВт
 $q_{к}$ — интенсивность поглощения тепла ограждающими конструкциями, кВт
 $q_{луч}$ — интенсивность излучения тепла за пределы помещения через проемы, кВт
 $q_{з.г}$ — интенсивность накопления тепла в зоне горения, кВт
 $q_{отв}$ — интенсивность отвода тепла от факела пламени, кДж/с
 h_0 — высота плоскости равных давлений (нейтральной зоны), м
 J — интенсивность подачи огнетушащего вещества, л/(с·м²)
 J_0 — критическая интенсивность подачи огнетушащего вещества, л/(с·м²)
 J_{opt} — оптимальная интенсивность подачи, л/(с·м²)
 $v_{уд}$ — удельный расход огнетушащего вещества, л/м²
 τ — время, с
 τ_t — время тушения, с
 $P_{пн}$ — пожарная нагрузка, кг/м²
 $F_{п}$ — площадь пожара, м²
 $F_{пг}$ — площадь поверхности горения, м²
 $K_{п}$ — коэффициент поверхности
 v_m — массовая скорость выгорания, кг/с
 v'_m — приведенная массовая скорость выгорания, кг/(с·м²)
 $v_{\bar{m}}$ — удельная массовая скорость выгорания, кг/(с·м²)

Продолжение прил. 2

- β — коэффициент полноты сгорания
 $v_{л}$ — линейная скорость распространения пламени, м/мин
 $v_{л}^{\text{табл}}$ — табличное значение $v_{л}$, м/мин
 L_{τ} — путь, пройденный фронтом пламени за время τ , м
 $J_{г}$ — интенсивность газообмена, кг/(с·м²)
 $\alpha_{н}$ — коэффициент избытка воздуха на нижнем концентрационном пределе
 $G_{в}$ — расход воздуха через проемы, кг/с
 $G_{в}^{\text{треб}}$ — расход воздуха, теоретически необходимый для сгорания вещества, кг/с
 μ — коэффициент расхода проема
 B — суммарная ширина открытых проемов, м
 $\rho_{в}$ — плотность воздуха, кг/м³
 $\rho_{г}$ — плотность дымовых газов, кг/м³
 $\varphi_{O_2}^{\text{пр}}$ — концентрация кислорода, при которой прекращается пламенное горение, об. %
 $\varphi_{O_2}^{\text{ср}}$ — среднеобъемная концентрация кислорода в помещении, об. %
 $\varphi_{O_2}^{\text{г}}$ — концентрация кислорода в выходящих газах, об. %
 H — высота проема, м
 h_1 — средневзвешенное расстояние от ПРД до геометрических центров приточных частей проемов, м
 k_1 — коэффициент излучения
 k_2 — коэффициент снижения температуры
 Q — суммарный теплоотвод воды, кДж
 $Q_{н.в}$ — количество тепла, затрачиваемое на нагрев воды до температуры кипения, кДж
 $Q_{н.п}$ — количество тепла, затрачиваемое на нагрев пара до температуры потухания, кДж
 $T_{г}^{\text{ст}}$ — температура горения стехиометрической смеси, К
 $T_{г}^{\text{н}}$ — температура горения смеси на НКПР, К
 $T_{\text{пот}}$ — температура потухания, К
 $C_{в}$ — удельная теплоемкость воды, кДж/(кг·К)
 $C_{п}$ — средняя удельная теплоемкость пара в диапазоне от 100 до 1000 °С, кДж/(кг·К)
 $g_{в}$ — расход воды, л/с
 $g^{\text{тр}}$ — требуемый расход воды, л/с

Приложение 3

Основные физические постоянные

Таблица 1

Название	Обозначение	Численное значение
Число Авогадро	N_A	$6,0225 \cdot 10^{23}$ моль ⁻¹
Универсальная газовая постоянная	R	8,3143 Дж/(моль·К)

Приложение 4

Атомные массы некоторых элементов

Таблица 2

Название	Химический знак	Порядковый номер	Атомная масса
Азот	N	7	14
Аргон	Ar	18	39,95
Бром	Br	35	79,9
Водород	H	1	1,01
Гелий	He	2	4,0
Йод	I	53	126,9
Кислород	O	8	16,0
Неон	Ne	10	20,18
Сера	S	16	32,06
Углерод	C	6	12,01
Фосфор	P	15	30,97
Фтор	F	9	19,0
Хлор	Cl	17	35,45

Приложение 5

Основные физические константы некоторых газов

Таблица 3

Название или химическая формула	M , кг/кмоль	ρ , кг/м ³	$T_{пл}$, К	$T_{кип}$, К	ΔH_f^0 , кДж/моль
Воздух	28,98	1,293	60	81	0
Ar	39,95	1,784	83,7	87,3	0
CO	28,01	1,250	68	81	112,7
CO ₂	44,01	1,977	216,4	194,5	396,9
CH ₄	16,04	0,717	90,5	112,4	75
C ₂ H ₆	30,06	1,357	90,5	184,4	88,4
C ₃ H ₈	44,10	2,019	85,6	230,9	109,4
H ₂ C ₄ H ₁₀	58,12	2,703	134,6	272,5	132,4
изо-C ₄ H ₁₀	58,12	2,668	113,4	261,3	-
C ₂ H ₄	28,05	1,260	110,8	169,3	-48,6
C ₂ H ₂	26,04	1,173	192,2	189,2	-224,6
H ₂	2,02	0,090	13,8	20,3	0
H ₂ O (пар)	18,02	0,768	273	373,0	242,2
N ₂	28,01	1,251	63	77,2	0
O ₂	32,0	1,429	54,6	90,1	0
NH ₃	17,0	0,770	-	240	46,1
H ₂ S	76,14	1,263	160,9	319,25	201,1

Примечание: M — молекулярная масса газа; ρ — плотность при нормальных условиях; $T_{пл}$ и $T_{кип}$ — температуры плавления и кипения при давлении 101 325 Па; ΔH_f^0 — теплота образования.

Приложение 6

Показатели пожарной опасности некоторых твердых горючих материалов

Таблица 4

Название вещества	$T_{всп}$, К	$T_{св}$, К	$Q_{н}$, кДж/кг
Антрацит	-	773	34400
Винипласт	623	723	18105
Волокно ацетатное	593	718	—
Волокно вискозное	508	733	—
Волокно лавсан	663	713	—
Волокно капрон	668	713	—
Древесина сосновая ($W = 9\%$)	528	672	18731-20853
Картон	632	713	31087
Каучук натуральный	402	648	44769
Линолеум ПВХ	603	683	13690-14309
Пенопласт ПХВ	699	774	18325-19493
Парафин ($C_{13} - C_{15}$)	371-385	473	—
Полистирол	618	763	39800-40700
Полиэтилен	-	653	46588
Стекло органическое	533	733	27702
Хлопок ($W = 4,5\%$)	483	680	15712,5

Приложение 7

Средняя объемная теплоемкость газов

Таблица 5

Температура T , К	c_p , кДж/($m^3 \cdot K$)*						
	CO ₂	H ₂ O	N ₂	O ₂	SO ₂	H ₂	CH ₄
500	1,79	1,52	1,30	1,37	1,89	1,30	1,76
600	1,86	1,54	1,31	1,37	1,96	1,30	1,89
700	1,93	1,57	1,32	1,38	2,01	1,30	2,01
800	1,99	1,59	1,33	1,40	2,07	1,31	2,14
900	2,04	1,63	1,34	1,41	2,12	1,31	2,26
1000	2,09	1,64	1,35	1,44	2,15	1,31	2,38
1100	2,13	1,67	1,37	1,45	2,18	1,32	2,50
1200	2,17	1,70	1,38	1,47	2,22	1,33	2,60
1300	2,20	1,72	1,39	1,48	2,24	1,33	2,70
1400	2,24	1,75	1,40	1,49	2,26	1,34	2,80
1500	2,26	1,78	1,41	1,50	2,28	1,34	2,86
1600	2,29	1,80	1,42	1,51	2,29	1,35	-
1700	2,30	1,83	1,43	1,52	2,31	1,36	-
1800	2,34	1,85	1,44	1,53	2,32	1,37	-
1900	2,36	1,88	1,45	1,54	2,34	1,38	-
2000	2,38	1,90	1,46	1,55	2,35	1,38	-
2100	2,39	1,92	1,47	1,55	2,36	1,39	-
2200	2,41	1,94	1,48	1,56	2,38	1,40	-
2300	2,42	1,96	1,48	1,57	2,40	1,41	-
2400	2,44	1,98	1,49	1,58	2,41	1,42	-
2500	2,45	2,00	1,50	1,58	2,43	1,42	-

* Средняя теплоемкость приводится для температурного интервала от 273 К до указанной в таблице температуры

Приложение 8

Энтальпия (теплосодержание) газов при постоянном давлении

Таблица 6

Температура, °С	Теплосодержание, кДж/моль					
	O ₂	N ₂	Воздух	CO ₂	H ₂ O	SO ₂
0	0	0	0	0	0	0
100	3,0	2,9	2,9	3,8	3,3	4,1
200	6,0	5,8	5,8	8,0	6,8	8,5
300	9,1	8,8	8,9	12,5	10,4	13,2
400	12,4	11,8	11,9	17,3	14,0	18,2
500	15,7	14,9	15,1	22,3	17,8	23,3
600	19,1	18,1	18,3	27,5	21,7	28,5
700	22,5	21,3	21,5	32,8	25,8	33,9
800	26,0	24,6	24,8	38,2	29,9	39,3
900	29,6	28,0	28,2	43,8	34,2	44,8
1000	33,1	31,3	31,6	49,4	38,6	50,3
1100	36,8	34,8	35,1	55,1	43,2	55,9
1200	40,4	38,2	38,6	60,9	47,8	61,5
1300	44,0	41,7	42,1	66,8	52,6	67,2
1400	47,7	45,3	45,6	72,7	57,4	72,3
1500	51,5	48,8	49,2	78,6	62,3	78,4
1600	55,2	52,4	52,8	84,6	67,3	84,1
1700	59,0	55,9	56,4	90,5	72,4	89,8
1800	62,8	59,5	60,0	96,6	77,6	95,6
1900	66,6	63,1	63,6	102,6	82,8	101,2
2000	70,4	66,8	67,3	108,6	88,1	107,1
2100	74,2	70,4	71,0	114,7	93,4	112,7
2200	78,1	74,1	74,7	120,8	98,8	118,5
2300	82,0	77,8	78,4	126,9	104,2	124,2
2400	85,9	81,5	82,1	133,0	109,6	130,0
2500	89,9	85,1	85,9	139,1	115,1	135,8
2600	94,0	89,0	89,3	145,3	119,4	141,5
2700	97,9	92,6	93,1	151,5	124,8	147,3
2800	101,8	96,4	96,8	157,6	130,3	153,0
2900	105,1	100,5	100,5	163,8	135,8	158,8
3000	110,1	103,8	104,2	169,9	141,2	164,7

Приложение 9

Константы уравнения Антуана для давления пара некоторых органических жидкостей в области указанных температур

$$\lg P = A - \frac{B}{T - C}, \text{ где } P, \text{ Па; } T, \text{ К}$$

Таблица 7

Жидкость	A	B	C	Интервал температур, К
Ацетон	9,376	1282	36,1	258-366
Бензол	9,109	1252	48,0	264-353
Гексан	8,995	1166	49,6	219-342
Глицерин	11,18	3074	58,5	414-536
Пентан	8,096	1063	41,2	223-309
Метанол	10,53	1660	27,4	263-363
Этанол	10,81	1918	21,1	242-351
Пропанол-1	10,44	1752	48,1	273-370
Бутанол-1	11,72	2665	-6,4	274-399
n-Амиловый спирт	9,307	1288	111,9	347-430
Толуол	9,08	1345	53,7	243-473
Эфир диэтиловый	9,123	1099	40,8	213-308

Приложение 10

Величины параметров K и ℓ для вычисления температурных пределов воспламенения некоторых жидкостей

Таблица 8

Гомологический ряд	Формула $n = 0, 1, 2, 3, \dots$	Параметры	
		K	ℓ
Нормальные алканы	$\text{CH}_3\text{-(CH}_2\text{)}_n\text{-CH}_3$	0,6957	73,8
		0,7874	50,3
2-метилалканы	$(\text{CH}_3)_2\text{-CH(CH}_2\text{)}_n\text{-CH}_3$	0,6885	74,9
		0,7900	52,2
Нормальные 1-алкены	$\text{CH}_2=\text{CH-(CH}_2\text{)}_n\text{-CH}_3$	0,6867	74,5
		0,7976	49,5
Нормальные жирные спирты	$\text{CH}_3\text{-(CH}_2\text{)}_n\text{-OH}$	0,5746	33,7
		0,6928	15,0
2-метилкарбинолы	$(\text{CH}_3)_2\text{CH-(CH}_2\text{)}_n\text{-OH}$	0,6582	44,1
		0,7278	21,5
n-Алкилформиаты	$\text{HCOO-(CH}_2\text{)}_n\text{-CH}_3$	0,5359	47,6
		0,6050	25,0
n-Алкилацетаты	$\text{CH}_3\text{ COO-(CH}_2\text{)}_n\text{-CH}_3$	0,5940	50,9
		0,7761	40,8

Примечание. Числитель параметра относится к нижнему температурному пределу воспламенения, знаменатель параметра - к верхнему температурному пределу воспламенения.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абдурагимов И.М., Андросов А.С., Исаев Л.К., Крылов Е.В., «Процессы горения». — М.: ВИПТШ МВД РФ, 1984, 389с.
2. Абдурагимов И.М., Говаров В.Ю., Макаров Е.В., «Физико-химические основы развития и тушения пожаров». — М.:ВИПТШ МВД РФ, 1988, 255с.
3. Демидов П.Г., Саушев В.С., «Горение и свойства горючих веществ».- М.:ВИПТШ МВД РФ, 1975, 278с.
4. Монахов В.Т. «Методы исследований пожарной опасности веществ». -М.: Химия, 1972, 413с.
5. Корольченко А.Я., Корольченко В.А. «Пожаровзрывоопасность веществ и материалов и средства их тушения». Справочник часть 1-2 — М.: Химия 2004 г.
6. ГОСТ 12.1.044-89. «Пожаровзрывоопасность веществ и материалов». Номенклатура показателей и методы их определения.