

МИНИСТЕРСТВО РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ ПО ДЕЛАМ
ГРАЖДАНСКОЙ ОБОРОНЫ, ЧРЕЗВЫЧАЙНЫМ СИТУАЦИЯМ
И ЛИКВИДАЦИИ ПОСЛЕДСТВИЙ СТИХИЙНЫХ БЕДСТВИЙ

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ГПС МЧС РОССИИ
ИМЕНИ ГЕРОЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ГЕНЕРАЛА АРМИИ Е.Н. ЗИНИЧЕВА



А.А. Пермяков А.А. Кузьмин Н.Н. Романов

ТЕРМОГАЗОДИНАМИЧЕСКИЙ РЕЖИМ ПОЖАРА В ПОМЕЩЕНИИ. КУРСОВОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ

Учебное пособие

*Рекомендовано Северо-западным отделением федерального
учебно-методического объединения в системе высшего образования
по УГСН 20.00.00 Техносферная безопасность и природообустройство
в качестве учебного пособия при реализации основных профессиональных
образовательных программ высшего образования по направлению подготовки
бакалавриата 20.03.01 Техносферная безопасность и по специальности
20.05.01 Пожарная безопасность*

Санкт-Петербург
2024

УДК 62
ББК 31.3
П27

Рецензенты:

Санкт-Петербургский государственный университет
информационных технологий, механики и оптики
доктор физико-математических наук, профессор
Ю.П. Заричняк

заслуженный работник высшей школы Российской Федерации
Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России
доктор педагогических наук, профессор
Ю.Г. Баскин

П27 А.А. Пермяков, А.А. Кузьмин, Н.Н. Романов.
Термогазодинамический режим пожара в помещении. Курсовое проектирование: учеб. пособие. СПб.: С.-Петерб. ун-т ГПС МЧС России, 2024. 136 с.

Учебное пособие содержит формулировку задания курсового проекта, порядок выполнения работы и методические рекомендации по применению интегральной модели при описании термогазодинамической картины внутреннего пожара.

В качестве объекта исследования в учебном пособии рассматриваются тепломассообменные процессы при пожаре в помещении, являющиеся основой для обоснования и разработки объёмно-планировочных решений при строительстве зданий и сооружений с учётом различных задач пожарной безопасности.

Учебное пособие предназначено для курсантов, студентов и слушателей, обучающихся по специальности 20.05.01 «Пожарная безопасность» и направлению подготовки 20.03.01 «Техносферная безопасность».

УДК 62
ББК 31.3

Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, 2024

СОДЕРЖАНИЕ

СОДЕРЖАНИЕ	3
УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ.....	5
ВВЕДЕНИЕ.....	6
1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ	7
1.1. Формулировка задания курсового проекта	8
1.2. Порядок выполнения курсового проекта и оформление расчётно- пояснительной записки	9
1.2.1. Порядок выполнения курсового проекта	9
1.2.2. Оформление расчётно-пояснительной записки	10
2. ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ОПАСНЫХ ФАКТОРОВ ПОЖАРА В ПОМЕЩЕНИИ	12
2.1. Опасные факторы пожара.....	12
2.2. Температурный режим при пожаре в помещении	17
2.3. Методы прогнозирования ОФП в помещении	25
2.4. Численная реализация математических моделей пожара в помещении ..	29
3. ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ ОСНОВНЫХ ПОЛОЖЕНИЙ ТЕОРИИ ТЕПЛООБМЕНА И РЕКОМЕНДАЦИИ ПРИ РЕШЕНИИ НЕКОТОРЫХ ЗАДАЧ ПОЖАРНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ	36
3.1. Теоретическое обоснование процессов теплопередачи на пожарах.....	36
3.2. Инженерные методики расчёта прогрева строительных конструкций	41
3.2.1. Численное моделирование прогрева железобетонных строительных конструкций	42
3.3. Выбор расчётных схем развития пожара.....	55
4. ПРИМЕРЫ ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИХ РАСЧЕТОВ В ОБЕСПЕЧЕНИИ ПОЖАРНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ.....	58
4.1. Расчёт среднеобъёмной температуры продуктов горения при свободно развивающемся пожаре в помещении.....	58
4.2. Расчёт расходов поступающего воздуха и газовой среды, удаляемой из помещения	62

4.3. Расчёт фактического предела огнестойкости элемента металлической конструкции	71
4.4. Расчёт необходимого времени эвакуации людей.....	80
5. РАСЧЁТ ТЕРМОГАЗОДИНАМИЧЕСКОГО РЕЖИМА ПРИ ПОЖАРЕ В ПОМЕЩЕНИИ НА ОСНОВЕ ИНТЕГРАЛЬНОЙ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ	83
5.1. ПЕРВЫЙ ЭТАП КУРСОВОГО ПРОЕКТА	83
5.2. ВТОРОЙ ЭТАП КУРСОВОГО ПРОЕКТА «Расчёт расходов поступающего воздуха и газовой среды, удаляемой из помещения».....	87
5.3. ТРЕТИЙ ЭТАП КУРСОВОГО ПРОЕКТА	90
5.4. ЧЕТВЁРТЫЙ ЭТАП КУРСОВОГО ПРОЕКТА «Расчёт необходимого времени эвакуации людей».....	95
Приложение А	98
Приложение Б.....	98
Приложение В	99
Приложение Г.....	118
Приложение Д	119
Приложение Е	120
Приложение Ж	121
Приложение З.....	122
Образец оформления титульного листа	126

УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

V – объём помещения, м^3

S – площадь пола, м^2

A – площадь проёма помещения, м^2

h – высота, м

Π – проёмность помещения, м

P – давление, Па

T – температура, К

t – температура, $^{\circ}\text{C}$

R – удельная газовая постоянная, $\text{Дж}/(\text{кг}\times\text{К})$

τ – время, с

G – массовый расход, $\text{кг}/\text{с}$

m – удельное количество пожарной нагрузки, $\text{кг}/\text{м}^2$

V_o – количество воздуха, необходимое для сгорания 1 кг материала пожарной нагрузки, $\text{кг}/\text{кг}$

$Q_{\text{нг}}^{\text{p}}$ – низшая теплота сгорания древесины, $\text{Дж}/\text{кг}$

$Q_{\text{н}}^{\text{p}}$ – низшая теплота сгорания материала пожарной нагрузки, $\text{Дж}/\text{кг}$

Ψ – удельная скорость выгорания, $\text{кг}/\text{м}^2\text{с}$

v – линейная скорость пламени, $\text{м}/\text{с}$

L_{O_2} – потребление кислорода, $\text{кг}/\text{кг}$

D_m – дымообразующая способность, $\text{Нп}\times\text{м}^2/\text{кг}$

L_{CO_2} – выделение CO_2 , $\text{кг}/\text{кг}$

L_{CO} – выделение CO , $\text{кг}/\text{кг}$

L_{HCl} – выделение HCl , $\text{кг}/\text{кг}$

λ – коэффициент теплопроводности, $\text{Вт}/(\text{м}\times\text{К})$

C – теплоёмкость, $\text{Дж}/(\text{кг}\times\text{К})$

ВВЕДЕНИЕ

Курсовой проект по дисциплине «Теплотехника» является одним из видов аттестационных испытаний, обучающихся по основной профессиональной образовательной программе. Выполнение курсовой работы на кафедре физико-технических основ обеспечения пожарной безопасности проводится с целью систематизации, закрепления и углубления, полученных в процессе обучения знаний. При этом обучающиеся приобретают навыки творческой работы, анализа и умения обоснованно, грамотно и логически излагать свои мысли и оформлять результаты работы при решении задач, которые могут им встретиться при дипломном проектировании и в практической деятельности.

Задачи курсового проекта. Курсовой проект по дисциплине «Теплотехника» является завершающим этапом изучения разделов «Термодинамика», «Теория тепломассообмена и промышленная теплотехника» и выполнение которой позволяет решить такие задачи, как:

- научиться применять теоретические знания дисциплины для решения инженерных задач по вопросам противопожарной защиты
- усвоить методики термогазодинамических расчетов;
- научиться квалифицированно применять техническую литературу и нормативные документы.

1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Содержание курсового проекта.

Курсовой проект включает в себя:

- титульный лист;
- задание на курсовой проект;
- пояснительную записку.

Численные значения, необходимые для выполнения индивидуального задания, зависят от номера зачётной книжки. Если номер зачетной книжки имеет один знак, например № 1, то слева необходимо приписать 00, т.е. номер варианта **001**. Если номер зачетной книжки имеет 2 знака, например, № 10, то слева необходимо приписать 0, т.е. номер варианта **010**. Если номер зачетной книжки имеет 4 знака, например, № 1020, то необходимо использовать только 3 знака справа, т.е. номер варианта **020**. Таким образом, любой одно-, двух- и более значный номер зачетной книжки приводится к трёхзначному номеру варианта выполняемого задания. Например, в варианте **012**, первой цифрой номера варианта является – 0, второй – 1, третьей – 2.

1.1. Формулировка задания курсового проекта «Термогазодинамический режим при пожаре в помещении»

Задание

В качестве объекта исследования выбирается помещение соответствующего назначения типовой формы размерами Ш×Д×В м. В помещении предусмотрены дверные и оконные проёмы. Параметры пожарной нагрузки для моделирования динамики опасных факторов пожара принимаются по справочным данным, приведённым в Приложении В.

Выполнение курсового проекта осуществляется в **4 этапа**:

- а) *на первом* – проводится расчёт изменения среднеобъёмной температуры внутреннего пожара во времени;
- б) *на втором* – выполняется расчёт газообмена на внутреннем пожаре;
- в) *на третьем* – осуществляется расчёт фактического предела огнестойкости одного из элементов несущей металлической конструкции;
- г) *на четвёртом* – определяется необходимое время для эвакуации людей.

Исходные данные для курсового проекта выбираются из табл. 1.1–1.3

Таблица 1.1 – Параметры пожарной нагрузки

Параметры	3 –я цифра варианта									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Зона расположения пожарной нагрузки (№ из Приложения В)	116	62	27	85	63	38	109	96	26	91
Ширина зоны, м	22	15	12	18	8	20	18	10	9	12
Длина зоны, м	30	10	16	28	10	36	32	18	17	12
Высота зоны, м	6	5	4	6	5	6	5	7	4	5
К-во оконных проёмов	3	1	2	2	1	4	4	2	3	2
К-во дверных проёмов	2	1	2	1	1	2	3	1	2	1
Общее к-во пожарной нагрузки ($M_{пн}$), кг	10000	3000	7500	6200	4000	10000	6000	6000	5000	4400

Таблица 1.2 – Характеристика проёмов

Вид проёма	Параметры проёмов	2 –я цифра варианта									
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Оконный	Ширина, м	2,3	1,8	1,6	1,8	1,6	2,2	1,7	1,6	1,5	1
	Высота, м	2	1,6	1,8	1,8	1,9	2	1,8	1,9	1,8	1,5
	Координата нижнего края проема, м	1,5	2	1,4	1	1,6	1,5	1,2	1,3	1,4	1
Дверной	Ширина, м	2	1,5	1,6	1,5	1,8	1,9	1,5	1,7	1,5	1,6
	Высота, м	2,2	2,1	2,2	2,0	2	2,2	2,1	2,2	2,0	2

Таблица 1.3 – Исходные данные

Параметры	1 –я цифра варианта									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$t_0, ^\circ\text{C}$	20	15	18	20	22	25	20	18	15	20
К-во расчётных моментов времени, n	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8

1.2. Порядок выполнения курсового проекта и оформление расчётно-пояснительной записки

1.2.1. Порядок выполнения курсового проекта

Руководство процессом курсового проектирования осуществляет преподаватель, проводящий в учебной группе практические занятия по теплотехнике. Он проводит для курсантов вводное занятие с изложением целей, задач, содержания и порядка выполнения и защиты работы с указанием важнейших требований, предъявляемых к содержанию и оформлению работы.

Руководитель курсового проекта составляет и выдаёт задание на выполнение проекта, проводит групповые и индивидуальные консультации, проверяет и принимает защиту работы курсантами.

Курсант оформляет проект во время самоподготовки. Консультации проводятся преподавателями, ведущими занятия по дисциплине, по графику, с которым можно ознакомиться на информационном стенде кафедры.

Защита курсового проекта является формой контроля знаний и умений курсанта, имеет цель – выявить степень его теоретической подготовленности и овладения практическими навыками по выполнению комплекса, предусмотренных курсовым проектом задач. При защите проекта выявляется способность курсанта практически использовать полученные им теоретические знания для самостоятельного решения поставленных задач, умение обосновать и защитить решения.

К защите допускаются работы, выполненные в соответствии с данными методическими указаниями и по своему варианту. Если работа не допущена

к защите, как не соответствующая предъявляемым требованиям, то она должна быть переработана по замечаниям руководителя и сдана на проверку повторно.

Курсовой проект с учётом результата защиты оценивается по четырём балльной системе. При неудовлетворительной защите курсанту даётся определённый срок на дополнительную подготовку. После этого защита проводится повторно и выставляется окончательная оценка. Повторная защита осуществляется перед комиссией, состоящей из ведущего данную группу преподавателя и председателя предметно-методической секции.

Для выполнения задач возможно использование Microsoft Excel. Оформить работу можно также с использованием любого текстового редактора или в рукописном виде.

1.2.2. Оформление расчётно-пояснительной записки

Курсовой проект оформляется в виде записки, содержащей все требуемые расчёты и пояснения к ним. К записке прилагаются необходимые графики и рисунки.

Текст всей записки должен быть выдержан в едином стиле.

Формулы приводимые в записке, должны быть, как правило, записаны сначала в общем виде, а затем уже должна быть произведены необходимые преобразования, подстановка исходных данных и выполнены необходимые вычисления. При подстановке исходных данных нужно внимательно следить за соблюдением одинаковой размерности. После получения значения искомой (промежуточной или окончательной) величины обязательно указывается единица измерения. Необходимая точность вычислений – три значащие цифры и порядок.

Страницы работы должны быть последовательно пронумерованы в правой верхней части страницы арабскими цифрами с точкой. Нумерация страниц должна быть сквозной от титульного листа до последней страницы, включая графики и рисунки. На титульном листе, который является первой страницей, номер страницы не ставится, хотя и подразумевается.

Содержание разделов оформляется в соответствии с указаниями в разделах данного пособия.

Результаты расчетов рекомендуется предоставлять ***после выполнения каждого этапа***, которые состоят из расчётно-пояснительной записки, графиков и таблиц, иллюстрирующих решение выполненной работы.

2. ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ОПАСНЫХ ФАКТОРОВ ПОЖАРА В ПОМЕЩЕНИИ

2.1. Опасные факторы пожара

Динамика пожара – процесс развития пожара во времени и пространстве, сопровождающийся воздействием его опасных факторов на окружающую среду.

Для того чтобы реально оценить возможные пожарные риски на каком-либо объекте защиты, необходимо прогнозировать закономерности динамики развития пожара, воздействие которого может привести к травме, отравлению, гибели человека и (или) к материальному ущербу.

К опасным факторам пожара для человека относятся: пламя, высокая температура, интенсивность теплового излучения, токсичные продукты горения (CO , CO_2 , HCl , HCN , COCl_2 , NO_2 , H_2S), дым, снижение содержания кислорода в воздухе, поскольку при достижении определённых уровней они поражают его организм.

Все перечисленные опасные факторы пожара рассматриваются как функции времени и являются физическими понятиями и, следовательно, каждый из них может быть представлен в количественном отношении физическими величинами.

Пламя – это видимая часть пространства (пламенная зона), внутри которой протекает процесс окисления (горения) и происходит тепловыделение, а также генерируются токсичные газообразные продукты горения и поглощается забираемый из окружающего пространства кислород. Кроме того, в границах этой части пространства (зоны) образуется специфическая дисперсная среда, особые оптические свойства которой обусловлены процессами рассеяния энергии световых волн вследствие их многократного отражения от мельчайших твёрдых (жидких) частиц. Этот процесс образования дисперсной среды, ухудшающей видимость, принято называть *процессом дымообразования*.

По отношению к объёму помещения, заполненному газом, пламенную зону можно рассматривать, с одной стороны, как «источник», поставляющий в помещение тепловую энергию и токсичные продукты горения, а также

мельчайшие твёрдые (жидкие) частицы, из-за которых ухудшается видимость. С другой стороны, пламенную зону можно рассматривать как «сток», в который уходит кислород из помещения.

Смысл понятия «пламя» может быть представлено в количественном отношении следующими величинами:

- площадью пожара F , [м²];
- скоростью выгорания ψ , [кг×с⁻¹];
- мощностью тепловыделения $Q_{\text{пож}} = \psi \times Q^p_{\text{н}}$, [Вт];
- количеством генерируемых за единицу времени токсичных газов $\psi \times L_i$, [кг·с⁻¹];
- количеством кислорода, потребляемого в зоне горения $\psi \cdot L_1$, [кг×с⁻¹],
- оптическим количеством дыма, образующегося в очаге горения $\psi \times D$, [Непер×м²×с⁻¹].

Здесь $Q^p_{\text{н}}$ – низшая теплота сгорания горючего материала, [Дж×кг⁻¹]; L_i – количество i -го токсичного газа, образующегося при сгорании единицы массы горючего материала; L_1 – количество кислорода, необходимое для сгорания (окисления) единицы массы горючего; D – дымообразующая способность горючего материала, [Непер×м²×кг⁻¹].

Тепловой поток количественно характеризуется плотностью – q , [Вт×м⁻²]. *Температура окружающей среды* – температура среды, заполняющей помещение (обозначается T , если используется размерность «Кельвин», или t , если используется размерность «градус Цельсия»).

Токсичные продукты горения количественно характеризуются парциальной плотностью (или концентрацией) каждого токсичного газа. Парциальная плотность компонентов газовой среды в помещении является параметром состояния, обозначается ρ_i , кг×м⁻³. Сумма парциальных плотностей всех компонентов газовой среды равна плотности газа ρ .

Концентрацией токсичного i -го газа обычно называют отношение парциальной плотности этого газа ρ_i к плотности газа ρ :

$$x = \frac{\rho_i}{\rho}.$$

Дым количественно представляют параметром, называемым оптической концентрацией дыма – μ , [Непер $\times$ м⁻¹].

Расстояние видимости в дыму $l_{вид}$ и оптическая концентрация дыма μ связаны между собой соотношением:

$$l_{вид} = \frac{2,38}{\mu}.$$

Вышеприведённые величины: температура среды, парциальные плотности (концентрации) токсичных газов и кислорода, оптическая плотность дыма – являются параметрами состояния среды, заполняющей помещение при пожаре. Они характеризуют свойства газовой среды в помещении. Начиная с момента возникновения пожара и далее, в процессе его развития эти параметры состояния непрерывно изменяются во времени, что и определяет сущность динамики ОФП.

Многочисленными исследованиями установлено, что во влажной атмосфере вторую степень ожога вызывает воздействие температуры 55 °С в течение 20 с и 70 °С – в течение 1 с, а плотность лучистых тепловых потоков 3 500 Вт $\times$ м⁻² вызывает ожоги дыхательных путей и открытых участков кожи практически мгновенно. К летальному исходу приводят следующие объёмные концентрации токсичных веществ в воздухе: 1,0 % окиси углерода (CO) – за 2–3 мин, 5 % двуокиси углерода (CO₂) – за 5 мин, 0,005 % цианистого водорода (HCN) – практически мгновенно. При объёмной концентрации хлористого водорода (HCL) 0,01–0,015 % останавливается дыхание. При снижении концентрации кислорода в воздухе с 23 до 16 % ухудшаются двигательные функции организма, а мускульная координация нарушается до такой степени, что самостоятельное движение людей становится невозможным. Снижение концентрации кислорода до 9 % приводит к смерти через 5 мин.

Совместное действие некоторых факторов усиливает их воздействие на организм человека (*синергетический эффект*). Так токсичность окиси углерода увеличивается при наличии дыма, снижении концентрации кислорода и повышении температуры и влажности среды; токсичность двуокиси азота –

при понижении концентрации кислорода и повышении температуры. Синергетический эффект обнаруживается при совместном воздействии цианистого водорода и окиси углерода.

Особое воздействие на людей оказывает дым, представляющий собой смесь несгоревших частиц углерода размером частиц от 0,05 мкм до 5,0 мкм. На этих частицах конденсируются токсичные газы. Поэтому воздействие дыма на человека также имеет синергетический эффект.

К *сопутствующим проявлениям* опасных факторов пожара относятся:

- осколки, части разрушившихся зданий, сооружений, строений, транспортных средств, технологических установок, оборудования, агрегатов, изделий и иного имущества;

- радиоактивные и токсичные вещества и материалы, попавшие в окружающую среду из разрушенных технологических установок, оборудования, агрегатов, изделий и иного имущества;

- вынос высокого напряжения на токопроводящие части технологических установок, оборудования, агрегатов, изделий и иного имущества;

- опасные факторы взрыва, произошедшего вследствие пожара;

- воздействие огнетушащих веществ.

В настоящее время при пожарах, в виду применения новых строительных, отделочных и конструктивных материалов выделяется значительное число токсинов, пагубно воздействующих на человека (см. табл. 2.1).

Таблица 2.1 – Источники образования токсичных компонентов газовой смеси при пожарах

Источник образования (материал)	Токсичные компоненты
Горючие материалы, содержащие углерод	Оксись и двуокись углерода
Целлулоид, полиуретаны	Оксиды азота
Древесина, шелк, целлюлозные материалы, вискоза, азотосодержащие пластмассы	Цианистый водород
Древесина, бумага	Акролеин
Резина, тиоколы	Диоксиды серы
Поливинилхлорид, фторированные пластмассы	Соляная, бромистоводородная, плавиковая кислоты, фосфоген
Меламин, нейлон, мочевиноформальдегид	Аммиак
Древесина, нейлон, полиэфирные смолы, фенолформальдегид	Альдегиды
Полистирол	Бензол
Пенополиуретан	Изоцианаты

Продолжительность НСП принято ассоциировать с так называемой *критической продолжительностью пожара* (КПП), при которой значения ОФП достигают предельно допустимых для жизни и здоровья людей параметров (см. табл. 2.2).

Другими словами, КПП – это интервал времени, в течение которого человеком ещё не потеряны ориентация и сознание, он сохраняет способность реально оценивать окружающую обстановку, уверенно принимать решения и выполнять соответствующие действия по эвакуации. Для разных ОФП значения КПП в общем случае могут существенно различаться. Наименьшее из них используется для определения необходимого времени эвакуации. Нормативными документами [1] установлены *критические (предельно допустимые)* значения (ПДЗ) опасных факторов пожара (см. табл. 2.2).

Таблица 2.2 – Предельно допустимые значения опасных факторов пожара

ОФП, обозначение, размерность	ПДЗ
Температура t , °C	70
Тепловой поток q , Вт/м ²	1 400
Парциальная плотность, кг/м ³ :	
– кислорода O ₂ , ρ_1	0,226 (15 %)
– оксида углерода CO, ρ_2	0,00116
– диоксида углерода CO ₂ , ρ_3	0,11
– хлористого водорода HCl, ρ_4	$0,023 \times 10^{-3}$
– цианистого водорода HCN, ρ_5	$0,2 \times 10^{-3}$
– фосгена COCl ₂ , ρ_6	$0,2 \times 10^{-3}$
– окислов азота NO ₂ , ρ_7	1×10^{-3}
– сероводорода H ₂ S, ρ_8	$1,1 \times 10^{-3}$
Дальность видимости $L_{\text{вид}}$, м	20

2.2. Температурный режим при пожаре в помещении

При рассмотрении воздействия ОФП на элементы конструкций и оборудование используются критические значения параметров, характеризующих термическое воздействие пожара на них. Например, при оценке воздействия пожара на железобетонные конструкции применяется понятие «критическое значение температуры арматуры» этих конструкций. Обычно считается, что при нагревании арматуры до 450–500 °C происходит разрушение железобетонной конструкции. При оценке воздействия пожара на остекление предполагается, что при температуре газовой среды в помещении, равной 250–300 °C, будет происходить разрушение остекления. Скорость роста температуры в подвалах и кабельных помещениях по опытным данным составляет в среднем 35–50 °C/мин.

Развитие пожара зависит от многих факторов:

- физико-химических свойств горящего материала;
- пожарной нагрузки (масса всех горючих и трудногорючих материалов, находящихся в горящем помещении);
- скорости выгорания пожарной нагрузки; газообмена очага пожара с окружающей средой и с внешней атмосферой и т.п.

Схема развития пожара, по которой происходит развитие практически любого пожара, включает в себя несколько фаз. Обычно выделяют три фазы:

- *начальную фазу* зарождения и развития пожара;
- *основную фазу* поддерживающую горение;
- *конечную фазу*, после которой пожар прекращается или завершается.

Указанные фазы можно выделить на любом пожаре вне зависимости от его места и времени.

Для начальной фазы характерно преимущественно линейное распространение огня вдоль горючего вещества или материала. Горение сопровождается обильным дымовыделением, что затрудняет определение места очага пожара. Среднеобъёмная температура повышается в помещении до 200 °С (темп увеличения среднеобъёмной температуры в помещении 15 °С в 1 мин). Приток воздуха в помещение сначала увеличивается, а затем медленно снижается.

Продолжительность фазы составляет 2–30 % от общей продолжительности пожара.

Во время этой фазы так же происходят такие процессы как:

- начало развития горения;
- увеличение температуры окружающей среды;
- уменьшение плотности газовой смеси внутри помещения;
- объёмное увеличение продуктов горения в помещении;
- появление избыточного давления внутри помещения, которое может достигать значений до нескольких десятков паскалей, благодаря чему газовая смесь выталкивается из помещения через всевозможные не плотности строительных конструкций;
- плавное снижение кислорода воздуха, за счёт которого поддерживается процесс горения;
- ухудшение видимости за счёт усиленного выделения дыма;
- значительное увеличение концентрации CO и CO₂.

В *основной фазе* развития пожара в помещении начинается объёмное развитие пожара, когда пламя заполняет весь объем помещения, и процесс распространения пламени происходит уже не поверхностно, а дистанционно, через воздушные разрывы. Во время этой фазы происходит разрушение остекления через 15–20 мин от начала пожара. Из-за разрушения остекления приток свежего воздуха резко увеличивает развитие пожара, а также происходит:

- рост среднеобъёмной температуры до возможного максимума 800–1 000 °С;
- значительное снижение объёма пожарной нагрузки за счёт энергичного горения;
- потеря массы материалов в единицу времени постоянно усиливается при горении и доходит до своей максимальной величины, в это время сгорает до 90 % от массы всех горючих веществ в помещении;
- незначительное изменение показателей температуры и плотность газов;
- приблизительно равно количество удаляемых и поступающих в помещение воздушных масс.

Во время *заключительной* фазы развития пожара наблюдается:

- плавное уменьшение температурных значений окружающей среды;
- значительно снижается при горении потеря массы вещества в единицу времени;
- начинается затухание после догорания тлеющих материалов;
- смещается равновесие в сторону поступления воздушных масс из вне, за счёт значительного снижения уходящих газов.

Тепло, выделяющееся во время пожара, становится главной причиной развития пожара и образования большого числа сопутствующих явлений. Благодаря этому теплу нагреваются окружающие материалы и вещества.

Выделение тепла на пожаре сопровождается перемещением потоков газа и задымлением пространства около зоны горения. Температурный режим является

важнейшей характеристикой определения изменения тепловыделения на пожаре, он определяется в зависимости от различных условий горения.

На температуру внутреннего пожара оказывает влияние ряд факторов, среди которых выделим следующие:

- особенности горючих веществ;
- количество и плотность расположения пожарной нагрузки;
- площадь горения;
- геометрические особенности помещения горения (площадь пола, высота от пола до потолка и т.д.);
- возможность и интенсивность газообмена с внешней средой за счёт расположения и размеров проёмов.

Значительное влияние на тепловой режим пожара и интенсивность развития оказывает газообмен.

При рассмотрении основных закономерностей газообмена при пожаре в ограждениях принимают ряд допущений:

- температура газов в помещении выше, чем температура окружающего воздуха, температура в помещении с течением времени изменяется монотонно;
- площади оконных и дверных проёмов по мере развития пожара не изменяются;
- расход воздуха, втекающего в помещение, равен расходу продуктов горения, удаляемых из помещения.

В виду того, что температура в помещении больше температуры наружного воздуха, то и плотность воздуха больше плотности нагретых продуктов горения. Через нижний проем воздух будет входить в помещение и, т.к. он более плотный, то будет выталкивать через верхний проем горячий газ (смесь продуктов горения с воздухом).

Так как, давление в нижней зоне помещения меньше, а в верхней больше, чем окружающей среды, то этим обусловлено направление газовых потоков. Таким образом, если условно весь объем помещения рассечь по высоте

на плоскости, то найдётся такая плоскость, где избыточное давление будет равно 0. Эта плоскость называется плоскостью равных давлений или нейтральной зоной (НЗ). Положение нейтральной зоны может меняться из-за изменения соотношения между площадями нижних и верхних проёмов.

Изменение соотношения площади проёмов к площади пожара в сторону увеличения ($F_{\text{пр}}/F_{\text{п}}$) приводит к росту температуры пожара. А уменьшение этого отношения приводит к увеличению продолжительности пожара. По интенсивности газообмена, которая определяет скорость роста температуры пожара, все помещения можно разделить на две группы:

- помещения, в которых отношение площади проёмов к площади пола меньше ($F_{\text{пр}}/F_{\text{п}} < 1/12$), относятся к помещениям с низкотемпературным режимом.

- помещения, у которых отношение ($F_{\text{пр}}/F_{\text{п}} > 1/12$), относятся к помещениям с высокотемпературным режимом пожаров.

Высота помещения оказывает существенное влияние на температуру пожара.

В высоких помещениях:

- скорость роста температуры пожара выше;
- значение температуры пожара ниже, чем в низких;
- средняя температура такого пожара может быть невелика.

В помещениях малой высоты:

- значение температуры выше, чем в высоких (это объясняется тем, что в высоких помещениях коэффициент избытка воздуха больше);
- развитие процесса горения сдерживает поступление воздуха и в объём самого помещения, и в зону горения;
- температура может быть одинакова по всему объёму.

Максимальная температура внутреннего пожара обычно выше среднеобъёмной и наблюдается в зоне горения. По мере удаления от зоны горения температура снижается. Приток воздуха в помещение увеличивает температуру пожара при неизменной площади пола и пожарной нагрузки.

Массовая скорость выгорания при внутреннем пожаре повышается с увеличением интенсивности газообмена, а затем некоторое время остаётся постоянной. Когда газообмен близок к условиям открытого пожара, то массовая скорость выгорания уже не зависит от размеров проёмов, а температура пожара достигает максимума.

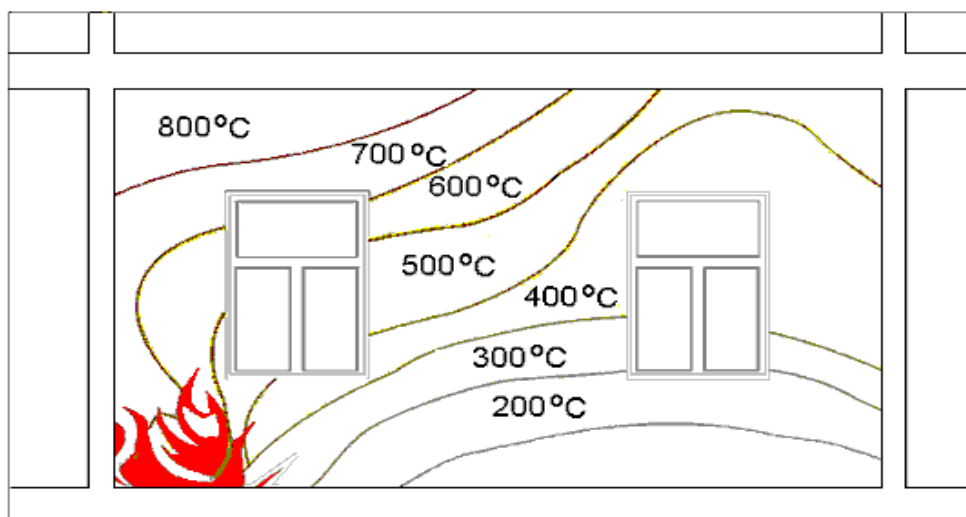


Рисунок 2.1 – Температурное поле внутреннего пожара

На рис. 2.1 показано температурное поле пожара в помещении объёмом 100 м^3 на 15-й мин. горения бензина на площади 2 м^2 . Наивысшая температура в зоне горения 900°C , в самой удалённой точке 200°C .

В начальной стадии пожара горение развивается за счёт того воздуха, который составляет свободный объём помещения. Если проёмы закрыты, то газообмен с окружающей средой отсутствует. Если есть открытые проёмы, то в начальный момент площадь пожара мала, а интенсивность газообмена велика.

В зависимости от соотношения массы горючего вещества и количества воздуха, пожар может протекать в двух режимах:

- пожары, регулируемые пожарной нагрузкой (ПРН);
- пожары, регулируемые вентиляцией (ПРВ).

В случае **ПРН** притока воздуха достаточно для достижения максимальной полноты сгорания, обусловленной видом горючего. В этом случае, массовая скорость выгорания не зависит от интенсивности газообмена, и ввиду того, что

теплота пожара прямо пропорциональна массовой скорости выгорания, то и она также зависит только от вида горючего материала.

В случае ПРВ массовая скорость выгорания ограничивает интенсивность газообмена, другими словами говоря, приток воздуха не обеспечивает максимальную полноту сгорания горючих материалов.

При увеличении интенсивности газообмена при ПРВ происходит:

- рост массовой скорости выгорания;
- увеличение интенсивности тепловыделения;
- возрастание среднеобъёмной температуры в помещении.

Для снижения температуры необходимо применение интенсивной принудительной вентиляции помещения, т.е. переход от ПРВ к ПРН. К сожалению, это приводит к росту в помещении давления, и, следовательно, к возрастанию опасности распространения пожара за пределы помещения, особенно, если ограждающие конструкции имеют низкую огнестойкость.

Темп изменения среднеобъёмной температуры среды в помещении (T_f), является основной характеристикой пожара при оценке пределов огнестойкости строительных конструкций, возникновении в помещении условий, представляющих опасность для людей.

Высокотемпературное воздействие греющей среды на строительную конструкцию может привести к наступлению одного или нескольких предельных состояний: потери несущей способности, целостности или потери теплоизолирующей способности. Время до наступления одного из предельных состояний для данной конструкции называется пределом огнестойкости и является важнейшей характеристикой строительной конструкции с точки зрения пожарной безопасности.

Требования пожарной безопасности считаются выполненными в том случае, если фактический предел огнестойкости конструкции выше, чем требуемый:

$$\tau_{\text{ф}} \geq \tau_{\text{тр}} \quad (1.1)$$

где

$\tau_{\text{ф}}$ – фактический предел огнестойкости конструкции;

$\tau_{\text{тр}}$ – требуемый предел огнестойкости конструкции.

Требуемый предел огнестойкости устанавливается нормативными правовыми актами и нормативными документами по пожарной безопасности, а фактический предел огнестойкости определяется либо путём натуральных испытаний либо путём расчёта.

В практике строительства металл, благодаря таким качествам, как высокая прочность, долговечность, способность воспринимать значительные нагрузки, удобство монтажа и т.д., имеет широкое распространение. При этом металлические конструкции очень чувствительны к нагреву – под воздействием высокой температуры со стороны нагретых газов при пожаре металл быстро теряет прочность и упругость, стремительно развиваются пластические и температурные деформации. Фактический предел огнестойкости незащищённых металлических конструкций составляет, как правило, не более 15 минут (R15) и зависит от марки металла, вида и размеров конструкции, схемы опирания и рабочей нагрузки.

В качестве защиты металлических конструкций, и, следовательно, увеличения предела огнестойкости используются такие способы как:

- конструктивная защита в виде: облицовки плитными, листовыми и другими огнеупорными материалами; нанесения штукатурки; применения различных толстослойных напыляемых составов и т.д.;

- нанесение тонкослойных огнезащитных покрытий, которые под воздействием высоких температур вспучиваются и создают на поверхности теплоизолирующий слой, позволяющий увеличить огнестойкость до значений R45–R60.

2.3. Методы прогнозирования ОФП в помещении

Современные научные методы прогнозирования ОФП и поведения строительных конструкций в условиях пожара базируются на *математических моделях* пожара в помещении.

Модель – это объект любой природы, который с той или иной степенью адекватности заменяет реальный исследуемый объект. Модели выбираются таким образом, чтобы они были проще и доступнее для исследования, чем реальные объекты.

Процесс исследования объектов на их моделях называют *моделированием*.

Моделирование – одна из основных категорий теории познания: на идее моделирования по существу базируется любой метод научного исследования – как теоретический, так и экспериментальный.

Разработка и применение математической модели заключается в следующей последовательности действий:

- во-первых, реальные объекты и явления заменяются на более простые и доступные для исследования в виде математических зависимостей;

- во-вторых, осуществляется разработка компьютерной программы на основе выбранного алгоритма вычислительных и логических операций для нахождения искомых величин;

- в третьих, для подтверждения адекватности выбранной модели, проводится отладка и тестирование программы в пробных вычислительных экспериментах на основе сравнения расчётных и экспериментальных натурных результатов.

После того как адекватность математической модели исходному объекту подтверждена, можно переходить к процессу исследования объекта.

Выделяют три основных *свойства* модели:

- а) *параметры* – в зависимости от того, с какой целью строится модель и какую задачу с её помощью планируется решать, выделяются существенные и несущественные;

б) *область определения* – область определения математической модели является важнейшим фактором, а применение модели вне области её определения может приводить к существенной недостоверности результатов;

в) *точность* – показывает, насколько результат расчетов соответствует процессам в реальной действительности.

В настоящее время математическое моделирование является наиболее эффективной и удобной формой решения практических задач.

Математическая модель пожара в самом общем виде описывает изменение параметров состояния среды в помещениях, а также ограждающих конструкций оборудования во времени. Основные уравнения, из которых состоит математическая модель пожара, вытекают из фундаментальных законов природы – первого закона термодинамики, закона сохранения массы и закона импульса. Эти уравнения отражают всю совокупность взаимосвязанных процессов, присущих пожару, таких как: тепловыделение в результате горения, дымовыделения в пламенной зоне; выделение и распространение токсичных газов; газообмен помещений с окружающей средой и со смежными помещениями; теплообмен и нагревание ограждающих конструкций; снижение концентрации кислорода в помещении.

Методы прогнозирования ОФП классифицируют в зависимости от используемых видов математических моделей пожара, которые отличаются разным уровнем детализации описания термогазодинамических процессов горения помещения. Выделяют три вида моделей: *интегральные, зонные, дифференциальные (полевые)*.

Интегральный метод является наиболее простым методом моделирования пожаров. В основе интегрального метода лежит предположение, которое заключается в том, что состояние газовой среды может определяться через осреднённые по всему объёму помещения термодинамические параметры.

Интегральная математическая модель пожара представляет собой систему обыкновенных дифференциальных уравнений, описывающих изменение среднеобъёмных параметров состояния газовой среды в помещении в процессе развития пожара

Основные упрощения термогазодинамической картины пожара в интегральной модели:

- газовая смесь состоит из идеальных газов;
- достаточно большой источник пожара;
- относительно небольшой объем помещений;
- хороший газообмен внутри помещений, обеспечивающий равномерное перемешивание продуктов горения.

Таким образом, интегральную модель можно применять:

- для зданий, имеющих помещения малого объема простой геометрической конфигурации;
- для помещений, где характерный размер очага пожара соизмерим с размерами помещения и размеры помещения соизмеримы между собой;
- для предварительных расчетов с целью выявления наиболее опасного сценария пожара.

Зонные математические модели позволяют описать достаточно детально развитие пожара, основываясь на фундаментальных законах природы – законах сохранения массы, импульса и энергии.

Газовая среда помещений является открытой термодинамической системой, обменивающейся массой и энергией с окружающей средой через открытые проёмы в ограждающих конструкциях помещения.

В зонной математической модели газовый объем помещения разбивается на характерные зоны, в которых для описания тепломассобмена используются соответствующие уравнения законов сохранения. Размеры и количество зон выбирается таким образом, что бы в пределах каждой из них неоднородность температурных и других полей параметров газовой среды были как можно минимальными, или из каких-то других предположений, определяемых задачами исследования и расположением горючего материала.

В результате расчёта по зонной модели находятся зависимости от времени следующих параметров тепломассообмена:

- среднеобъёмных значений температуры, давления, массовых концентраций кислорода, азота, огнетушащего газа и продуктов горения, а также оптической плотности дыма и дальности видимости в нагретом задымленном припотолочном слое в помещении;

- нижнюю границу нагретого задымленного припотолочного слоя;

- распределение по высоте колонки массового расхода, осреднённых по поперечному сечению колонки величин температуры и эффективной степени черноты газовой смеси;

- массовых расходов истечения газов наружу и притока наружного воздуха внутрь через открытые проёмы;

- тепловых потоков, отводящих в потолок, стены и пол, а также излучаемых через проёмы;

- температуры (температурных полей) ограждающих конструкций.

Другими словами – состояние газовой среды в зонных моделях определяется средними термодинамическими параметрами в нескольких зонах, причём межзонные границы обычно считаются подвижными.

Однако для применения зонных моделей требуется более подробная информация о пожаре, чем осреднённые по всему объёму значения параметров. Получение данной информации необходимо для упрощений и допущений, которые являются основой зонного моделирования.

Зонную модель можно применять:

- для помещений и систем помещений простой геометрической конфигурации (линейные размеры помещения отличаются не более чем в пять раз);

- для помещений большого объёма, когда размер очага пожара существенно меньше размеров помещения;

- для рабочих зон, расположенных на разных уровнях в пределах одного помещения (наклонный зрительный зал кинотеатра, антресоли и др.);

Полевые математические модели, являются более точным и универсальным инструментом, чем зонные, так как в них выделяется не две зоны, а тысячи или десятки тысяч маленьких объёмов. Для каждого из этих объёмов с помощью численных методов решается система уравнений в частных производных, выражающих фундаментальные законы сохранения в каждой точке расчётной области. С помощью данной модели можно провести расчёт температуры, скорости реакции, концентрации газовых компонентов в определённой точке расчётной области.

Таким образом, полевой метод рекомендуется использовать не только для выбора рационального варианта противопожарной защиты конкретных объектов, но и для проведения исследований научного характера, имеющих своей целью определение основ закономерностей динамики пожара.

Полевой метод применим для рассмотрения любого сценария развития пожара, потому что в его основе нет никаких априорных допущений о структуре течения процесса, но его использование требует значительных вычислительных ресурсов, что в свою очередь приводит к ограничению на размеры рассматриваемых объектов и проведения многовариантных расчетов.

2.4. Численная реализация математических моделей пожара в помещении

Интегральная модель пожара

К настоящему времени известно несколько численных программных реализаций интегральной модели пожара в помещении. Информация по зарубежным программам может быть получена из источников [13, 16, 17, 18].

Первой российской разработкой является программа INTMODEL, которая была реализована в ВИПТШ МВД России в 1995 г. Она позволяет рассчитывать только одно помещение прямоугольной формы. Площадь, занятая горючей нагрузкой, находится в центре помещения. Пожар распространяется вкруговую, но учитывается размер площадки. Принимается во внимание также приточная и

вытяжная вентиляция, пожаротушение углекислым газом или азотом. Учитывается газообмен через два проёма (дверь и окно).

Другая российская программа – КИС РТП (компьютерная имитационная система развития и тушения пожаров в зданиях) – разработана в Уральском институте ГПС МЧС России. Она реализует классическую интегральную модель путём решения дифференциальных уравнений численными методами. В качестве объектов расчёта могут быть выбраны помещения произвольной формы с любым количеством источников зажигания, несколькими различными видами горючих нагрузок (одновременно), произвольным количеством элементов приточной и вытяжной вентиляции, систем пожаротушения (водой, углекислым газом, азотом), различными пределами огнестойкости горючих и негорючих стен и перегородок. Для противопожарных систем предполагается возможность выбора одного из нескольких условий включения. При определённом задымлении (имитируется работа дымовых извещателей), температуре (тепловых извещателей), ручное включение и др. В процессе моделирования пожара можно управлять этими системами (включать-выключать вентиляцию, осуществлять пожаротушение и т.п.), а также открывать и закрывать двери и окна. В результате моделирования получаются временные зависимости параметров ОФП.

Примером практически используемого программного продукта, реализующего численное решение интегральной математической модели для совокупности связанных помещений, является разработка «СИТИС: ВИМ» компании «СИТИС» [13, 19]. В программном комплексе «СИТИС: ВИМ» реализован алгоритм численного решения интегральной модели пожара во взаимосвязи с моделью распространения пожара по площади. Система уравнений интегральной модели пожара, и соответственно, алгоритмы её решения зависят от количества помещений и проёмов между ними. Поэтому имитационная система должна обладать функциями анализа введённой пользователем планировки здания и автоматического построения соответствующей системы балансовых уравнений.

Зонная модель пожара

На сегодняшний день одной из лучших двузонных моделей и соответствующих компьютерных программ для расчёта тепломассопереноса при пожаре в помещениях зданий является – комплекс CFAST (Consolidated Fire Growth and Smoke Transport Model – единая модель развития пожара и перемещения дыма), созданный пожарным исследовательским отделом Национального института стандартов и технологии США [15]. Модель тепломассопереноса CFAST предполагает разделение каждого расчётного помещения на два контрольных объёма (зоны) – верхний (дымовой) слой и нижний слой. Дополнительными контрольными объёмами в помещении с источником пожара являются дымовая и припотолочная струя. В пределах каждой зоны температурные и другие поля параметров газовой среды считаются однородными.

Уравнения математической модели CFAST отражают всю совокупность взаимосвязанных процессов, присущих пожару: таких как тепловыделение в результате горения, дымовыделение в пламенной зоне, изменение оптических свойств газовой среды, выделение и распространение токсичных газов, газообмен помещений с окружающей средой и со смежными помещениями, теплообмен и нагревание ограждающих конструкций, снижение концентрации кислорода в помещении. Параметры среды в каждой зоне общие – искомые функции, независимый аргумент – время. Также искомыми функциями являются координаты, определяющие положение границ характерных зон (в первую очередь, высоту дымового слоя).

В модели CFAST уравнения сформулированы относительно следующих переменных: давление, объем дымового слоя, температура верхнего и нижнего слоёв. Все процессы в модели могут быть описаны в терминах массовых и тепловых потоков. Так, например, вентиляция есть обмен массой и энергией между зонами соседних помещений; пламя есть увеличение энергии верхнего слоя, а также передача массы и энергии из нижнего слоя в верхний; конвекция представляет собой обмен энергией между газовым слоем и окружающими стенами. Используя определения плотности, внутренней

энергии и состояния идеального газа, уравнения можно формулировать различными способами, которые эквивалентны физически, но отличаются вычислительными свойствами.

Программа CFAST 6.1 [15] позволяет прогнозировать параметры продуктов горения: температуру, снижение видимости, концентрацию токсичных продуктов горения – и их распространение по зданию.

Российской компанией «СИТИС» разработана локализованная программная версия «СИТИС: Блок» [21], в которой программа CFAST 6.1 является расчётным модулем. «СИТИС: Блок» позволяет пользователю осуществлять ввод данных, затем «СИТИС: Блок» преобразует данные в формат CFAST и запускает расчётный модуль. После выполнения расчетов «СИТИС: Блок» преобразует результаты в удобный для восприятия вид и предоставляет их пользователю.

Полевая (дифференциальная) модель пожара

В качестве примера численной реализации дифференциальных моделей, которые достаточно точно описывают поля скоростей, температур и концентраций на начальной стадии пожара, можно привести такие компьютерные программы, как PHOENICS, JASMINE, SOFIE, FDS, FLUENT, CFX [13, 16, 17, 18, 20]. Вместе с тем, для проведения расчетов могут быть использованы и другие программные комплексы, апробированные на основе сравнения с экспериментальными данными.

Наиболее полной и универсальной дифференциальной моделью пожара, получившей широкое практическое применение, является математическая модель **FDS** (Fire Dynamic Simulator – «Модель динамики пожара») [16]. Разработчиками FDS является Национальный институт стандартов и технологии США в международной кооперации с научно-исследовательскими организациями США, Канады и Финляндии. Математическая модель FDS базируется на использовании дифференциальных уравнений в частных производных, описывающих пространственно-временное распределение

температуры и скоростей газовой среды в помещении, концентраций компонентов газовой среды (кислорода, продуктов горения т.д.), давлений и плотностей газов. Эта модель реализована в соответствующем программном комплексе Fenix+/Fenix+ 2. Результатом расчёта в FDS становятся поля температур, скоростей, давлений, концентраций дыма и продуктов горения и других величин. Существует ряд проблем, которые на сегодняшний день ограничивают возможности практического использования дифференциальных (полевых) моделей для достоверного прогнозирования ОФП (например, недостаточная изученность явлений турбулентности, процессов в очагах горения, радиационного теплопереноса и некоторых других вопросов термогазодинамики пожаров). Однако, несмотря на перечисленные сложности в развитии и использовании дифференциальных моделей пожара, их совершенствование продолжается.

Заключение

Использование компьютерных программ для решения практических задач прогнозирования ОФП, особенно реализующих дифференциальные математические модели, требует существенных затрат времени на освоение и настройку программы, ввод исходных данных, получение и адекватную интерпретацию результатов. Кроме того, следует отметить, что *далеко не для всех прикладных вопросов пожарно-технических задач необходима столь детальная информация о динамике пожара*, которую пока лишь только в принципе могут давать, например, дифференциальные модели.

Обычно для большинства инженеров и проектировщиков использование компьютерной программы для исследования динамики ОФП и определения КПП по-прежнему является трудоёмкой процедурой, особенно в связи с необходимостью выполнять анализ многофакторной задачи обеспечения безопасной эвакуации людей из помещения при возникновении пожара. В связи с этим не теряют актуальность вопросы разработки относительно простых

инженерных методик определения КПП, основанных на аналитических соотношениях, позволяющих рассчитывать параметры ОФП без применения компьютерного моделирования.

Наиболее простой в вычислительном отношении является интегральная математическая модель динамики ОФП в помещении. Практически, применение интегральной модели ограничивается объёмными пожарами. Когда в результате интенсивного перемешивания газовой среды локальные значения её параметров в любой точке близки к среднеобъёмным, а также для зданий и сооружений, имеющих помещения малого объёма простой геометрической конфигурации и небольшую проёмность (т.е. отношение площади проёмов к площади ограждающих конструкций составляет величину порядка 1 % и менее).

Термогазодинамический расчёт режима при пожаре при таких условиях в помещении на основе интегральной математической модели позволяет:

- установить термогазодинамическую картину пожара (*изменение среднеобъёмной температуры продуктов горения во времени, расходы поступающего воздуха и газовой среды, удаляемой из помещения*);
- провести теплотехнический расчёт ограждающих конструкций;
- оценить огнестойкость металлических конструкций по потере несущей способности;
- осуществить разработку проектов огнезащиты металлических несущих конструкций;
- рассчитать необходимое и фактическое время эвакуации людей из помещения;
- и т.д.

3. ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ ОСНОВНЫХ ПОЛОЖЕНИЙ ТЕОРИИ ТЕПЛООБМЕНА И РЕКОМЕНДАЦИИ ПРИ РЕШЕНИИ НЕКОТОРЫХ ЗАДАЧ ПОЖАРНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

3.1. Теоретическое обоснование процессов теплопередачи на пожарах

В практике пожарного дела большинство теплофизических явлений, возникающие в условиях пожара, являются нестационарными процессами.

Так, например, основным фактором, воздействующим на строительные конструкции при пожарах, является высокая температура, под воздействием которой утрачивается несущая и ограждающая способность конструкций. Поэтому для исследования прогрева и оценки огнестойкости конструкций, необходимо нахождение меняющегося температурного поля в исследуемом объекте, которое возможно при решении задачи нестационарной теплопроводности в твёрдых телах. Уравнение нестационарной теплопроводности в одномерной постановке можно записать в виде:

$$\frac{\partial t_w}{\partial \tau} = a \times \frac{\partial^2 t_w}{\partial x^2}. \quad (3.1)$$

Здесь t_w , a – температура и коэффициент температуропроводности материала исследуемого объекта.

Для решения этой задачи применительно к конкретному объекту исследования необходима постановка задачи, включающая не только фиксацию геометрической формы теплопроводящего тела, его физические свойства (коэффициенты теплопроводности и температуропроводности), но и задание так называемые краевых условий.

В состав краевых условий входят начальное распределение температуры (начальное условие) и условия на границах (граничные условия). Условия на границах задаются в виде закона взаимодействия между поверхностью твёрдого тела и окружающей его средой (*при решении задач пожарной безопасности – между ограждающей конструкцией и продуктами горения*).

Указанные условия в совокупности определяют одно единственное явление и в этом смысле называются условиями однозначности.

Задание начальных условий реализуется в виде закона распределения температуры в массиве в начальный момент времени (т.е. до начала пожара):

$$t_w(x, y, z, 0) = f(x, y, z), \quad (3.2)$$

где $f(x, y, z)$ – известная функция.

Для многих задач пожарной безопасности предполагают равномерное распределение температуры тела до начала пожара.

Тогда

$$t_w(x, y, z, 0) = t_0 = \text{const}. \quad (3.3)$$

В зависимости от характера явлений, могут быть представлены одним из нижеперечисленных способов.

1) **Граничные условия первого рода** заключается в задании распределения температуры на поверхности тела в любой момент времени, т.е.

$$t_w(\tau) = f(\tau), \quad (3.4)$$

где $t_w(\tau)$ – температура на поверхности тела.

Для частного случая, когда $t_w(\tau) = t_f = \text{const}$, считается, что температура на поверхности остаётся постоянной в ходе всего процесса теплообмена. Это можно реализовать в ходе искусственного поддержания постоянства температуры или при создании специальных условий теплообмена между окружающей средой (например, продуктов горения на пожаре) и поверхность тела.

2) **Граничные условия второго рода** заключается в задании временной зависимости плотности теплового потока для любой точки поверхности тела, т.е.:

$$q_w(\tau) = f(\tau). \quad (3.5)$$

Простейший случай граничного условия второго рода предполагает постоянство плотности теплового потока:

$$q_f(\tau) = \text{const.} \quad (3.6)$$

Подобный случай теплообмена происходит в процессе нагревания тел в условиях открытых пожаров, когда теплопередача в основном происходит в ходе излучения в соответствии с законом Й. Стефана – Л. Больцмана, когда температура тела существенно меньше температуры излучающей поверхности факела.

3) **Граничные условия третьего рода** предполагают, что известны в любой момент времени температура среды, омывающей поверхность тела, и интенсивность теплообмена между средой и поверхностью твёрдого тела.

При этих условиях количество тепла, которое передаётся за единицу времени от окружающей среды, имеющей температуру T_f , на единичную поверхность твёрдого тела с температурой t_w в ходе нагревания ($T_f > T_w$), прямо пропорционально разнице температур между окружающей средой и поверхностью тела (закон И. Ньютона – Г. Рихмана), т.е.:

$$q_w = \alpha \times (t_f - t_w), \quad (3.7)$$

где α – коэффициент теплообмена, $\text{Вт} / (\text{м}^2 \times \text{К})$.

Предполагая, что теплопередача от этой среды к телу вблизи его поверхности происходит только за счёт теплопроводности вещества пограничного слоя, граничные условия принимают следующий вид:

$$-\lambda \times \left(\frac{\partial t_w}{\partial n} \right)_w = \alpha \times (t_f - t_w), \quad (3.8)$$

где λ – коэффициент теплопроводности твёрдого тела.

Граничные условия третьего рода могут быть применены и в ситуации, когда необходимо учитывать лучистую и конвективную составляющие теплообмена между твёрдой поверхностью и средой.

Для расчёта случая лучисто-конвективного теплообмена можно применять уравнение, аналогичное уравнению конвективного теплообмена (3.7), но с суммарным коэффициентом теплоотдачи α , $Вт/(м^2 \times К)$:

$$\alpha = \alpha_k + \alpha_l, \quad (3.9)$$

где α_k – коэффициент теплоотдачи, учитывающий распространение тепла конвективным теплообменом, а α_l – распространение за счёт излучения (лучистого теплообмена).

Допустим, температура стенки равна t_w , а температура окружающей среды – t_f .

В этом случае плотность теплового потока q_w , переносимого за счет конвекции, составит

$$q_k = \alpha_k \times (t_f - t_w), \quad (3.10)$$

а за счёт теплового излучения:

$$q_l = C_0 \times \varepsilon_{пр} \times \left[\left(\frac{T_f}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_w}{100} \right)^4 \right]. \quad (3.11)$$

Суммируя выражения (3.10) и (3.11), получаем:

$$q_w = q_k + q_l = \left\{ \alpha_k \times (t_f - t_w) + C_0 \times \varepsilon_{пр} \times \left[\left(\frac{T_f}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_w}{100} \right)^4 \right] \right\}.$$

Если вынести разность температур $(t_f - t_w)$ в уравнении за скобки, то:

$$q_w = \left\{ \alpha_k + \frac{C_0 \times \varepsilon_{пр} \times \left[\left(\frac{T_f}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_w}{100} \right)^4 \right]}{T_f - T_w} \right\} \times (T_f - T_w) \quad (3.12)$$

или

$$q_w = (\alpha_k + \alpha_l) \times (t_f - t_w) = \alpha \times (t_f - t_w), \quad (3.13)$$

где коэффициент теплоотдачи, учитывающий распространение тепла за счёт излучения (лучистого теплообмена) α_l определяется по формуле:

$$\alpha_l = \frac{C_0 \times \varepsilon_{пр} \times \left[\left(\frac{T_f}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_w}{100} \right)^4 \right]}{T_f - T_w}. \quad (3.14)$$

Здесь $\varepsilon_{пр}$ – приведённая степень черноты, определяемая по формуле:

$$\varepsilon_{\text{пр}} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_2} + \frac{1}{\varepsilon_1} - 1},$$

где $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ – степени черноты поверхности твёрдого тела и окружающей среды, соответственно.

В общем случае, коэффициент теплоотдачи, учитывающий распространение тепла за счёт конвекции α_k определяется как:

$$\alpha_k = \frac{Nu \times \lambda_f}{L} \quad (3.15)$$

$$\text{Здесь } Nu = C \times (Gr_m \times Pr_m)^n, \quad Gr_m = \frac{g \times \beta \times L^3 \times (T_f - T_w)}{\vartheta^2},$$

где Nu – критерий Нуссельта, при расчёте которого значения коэффициента C и показателя степени n для вертикальных поверхностей выбираются в зависимости от произведения $Gr_m \times Pr_m$ (см. табл. 3.1); L – определяющий размер, м; Pr – критерий Прандтля (см. Приложение А); λ_f — теплопроводность среды, Вт/(м·°С) (см. Приложение А); $C_0=5,67$ – коэффициент излучения абсолютно чёрного тела; ϑ – кинематическая вязкость среды, м²/с; β – коэффициент объёмного расширения [$\beta = 1/T_m$, К⁻¹]; g – ускорение свободного падения.

Таблица 3.1

$Gr_m \times Pr_m$	C	n
$1 \times 10^{-3} - 5 \times 10^2$	1,18	0,125
$5 \times 10^2 - 2 \times 10^7$	0,54	0,25
$2 \times 10^7 - 1 \times 10^{13}$	0,135	0,33

В качестве определяющей температуры в этом случае берётся средняя температура:

$$t_m = 0,5 \times (t_f + t_w) \quad (3.16)$$

Для решения задач прогрева при пожаре строительных конструкций при граничных условиях третьего рода предлагается проводить расчёты коэффициентов теплоотдачи по следующим формулам:

– между продуктами горения и поверхностью конструкции:

$$\alpha = 29 + \frac{C_0 \times \varepsilon_{\text{пр}} \times \left[\left(\frac{T_f}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_w}{100} \right)^4 \right]}{T_f - T_w} ; \quad (3.17)$$

Здесь

$$\varepsilon_{\text{пр}} \approx \varepsilon_1 ;$$

– со стороны необогреваемой поверхности усреднённое значение:

$$\alpha = 4,83 + 8,875 \times \varepsilon_1 . \quad (3.18)$$

3.2. Инженерные методики расчёта прогрева строительных конструкций

В практической деятельности, как правило, применяют численные методы, которые пригодны для тел сложной конфигурации, неоднородных с переменными граничными условиями и зависимых от температуры теплофизических свойств материала объекта исследования.

Одним из наиболее популярных методов является конечно-разностный метод решения задач нестационарной теплопроводности. Данным методом может быть решена практически любая задача теплопроводности.

Сущность метода конечных разностей состоит в замене дифференциального уравнения теплопроводности его конечно-разностным аналогом. При этом, во-первых, тело рассматривают состоящим из конечного числа слоёв; во-вторых, непрерывное распределение температуры в теле заменяется ступенчатым как в пространстве, так и во времени.

Наиболее просто решаются конечно-разностные уравнения соответствующие явной схеме. Смысл явной схемы заключается в том, что при нахождении температур в любой момент времени используются уже известные значения температур с предыдущего момента времени, т.е. осуществляется последовательное решение уравнений с одним неизвестным (искомой температурой).

Однако для численного метода решения системы уравнений вопросы точности играют первостепенную роль. Сравнительный анализ точных решений дифференциальных уравнений с численными решениями конечно-разностных аналогов позволил сделать вывод о необходимости выполнения некоторого условия разбиения на пространственные и временные слои (условие устойчивости), нарушение которого приводит к возникновению неустойчивости схемы, т.е. к быстрому накоплению погрешности.

Однако условие устойчивости для явных схем может привести к ситуации, когда с целью повышения точности пространственный слой (Δx) выбирается достаточно малым, что в свою очередь приведёт к такому уменьшению временного интервала ($\Delta \tau$), что для завершения процесса решения задачи потребуется огромное количество шагов по времени.

Неявные разностные схемы не имеют никаких ограничений на выбор шага по времени. Именно поэтому неявные схемы чаще всего используются при решении задач, в которых точность решения является важным фактором. Однако главным недостатком применения неявных схем является то, что в отличие от явных схем необходимо решение сразу всей системы уравнений, записанных для каждого пространственного слоя.

3.2.1. Численное моделирование прогрева железобетонных строительных конструкций

Применение метода конечных разностей можно рассмотреть на примере решения одномерной задачи нестационарной теплопроводности плоской железобетонной стенки по явной схеме.

Дифференциальное уравнение теплопроводности (в одномерной постановке) для плоской стенки имеет вид:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a(t) \times \frac{\partial^2 t}{\partial x^2}, \quad (3.19)$$

где $a(t) = \frac{\lambda(t)}{c(t) \cdot \rho}$ — коэффициент температуропроводности, $[m^2/c]$; $\lambda(t)$ — коэффициент теплопроводности, $[Вт/(м \times C)]$; $c(t)$ — теплоёмкость, $[Дж/кг \times ^\circ C]$; ρ — плотность материала конструкции, $[кг/м^3]$.

Заменяя дифференциалы в уравнении (3.19) конечными приращениями, для этого всю толщину стенки δ разделим на n слоев одинаковой толщины Δx .

$$\Delta x = \frac{\delta}{n}. \quad (3.20)$$

и обозначив их индексами « i » (т. е. индекс « i » будет меняться от 0 до n , $i = 0, \dots, n$).

По аналогии с разностной сеткой для пространственных координат выбирается расчётный интервал по времени $\Delta \tau$. Индекс « j » ($j = 0, 1, 2, \dots, k$) характеризует температуру в расчётный момент времени $t(\tau_j)$.

В таком случае, например, $t(x_i, \tau_j)$ обозначает температуру в середине i -го слоя в момент времени j (т. е. температуру в точке с координатами $x_i = i \cdot \Delta x$ и $\tau_j = j \times \Delta \tau$).

Приближенное значение величины $t(i \times \Delta x, j \times \Delta \tau)$ будем для удобства записывать в индексной форме, т.е.

$$t_{i,j} = t(x_i, \tau_j) = t(i \times \Delta x, j \times \Delta \tau). \quad (3.21)$$

Функция, определённая в узлах сетки, называется сеточной функцией. Таким образом, мы заменили область непрерывного изменения температуры областью дискретного изменения, т. е. аппроксимировали пространство решений дифференциального уравнения пространством сеточных функций.

Аппроксимация функций — операция неоднозначная. Исходя из конкретных физических условий протекания процесса, первую производную температуры по координате абсцисс x в момент времени $j \times \Delta \tau$ и изменение температуры во времени для любого i -того слоя, можно представить следующими разностными выражениями:

$$\frac{\partial t}{\partial x} = \frac{t_{i+1,j} - t_{i,j}}{\Delta x}; \quad \frac{\partial t}{\partial x} = \frac{t_{i,j} - t_{i-1,j}}{\Delta x}; \quad \frac{\partial t}{\partial x} = \frac{t_{i+1,j} - t_{i-1,j}}{2 \cdot \Delta x}. \quad (3.22)$$

Соотношения (3.22) называют соответственно правой, левой и центральной разностями. Все они при $\Delta x \rightarrow 0$ стремятся к $\frac{\partial t}{\partial x}$. Производная от температуры по времени для слоя i имеет следующий вид:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{t_{i,j} - t_{i,j-1}}{\Delta \tau}. \quad (3.23)$$

Вторую производную температуры $\frac{\partial^2 t}{\partial x^2}$ можно заменить, как и в случае первой производной, используя различные приёмы. Например, можно записать:

$$\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} = \frac{t_{i+1,j} - 2 \times t_{i,j} + t_{i-1,j}}{\Delta x^2}. \quad (3.24)$$

Подставляя, полученные значения (3.23) и (3.24) в уравнение (3.19), имеем:

$$\frac{t_{i,j} - t_{i,j-1}}{\Delta \tau} = a(t) \times \frac{t_{i+1,j} - 2 \times t_{i,j} + t_{i-1,j}}{\Delta x^2}. \quad (3.25)$$

Уравнение (3.25) является разностным аналогом дифференциального уравнения теплопроводности (3.19).

При граничных условиях третьего рода:

$$\frac{\partial t}{\partial x} \Big|_{x=0} = \frac{\alpha_1}{\lambda(t)} \times (t_{f1} - t_{0,j}), \quad (3.26)$$

$$\frac{\partial t}{\partial x} \Big|_{x=\delta} = -\frac{\alpha_2}{\lambda(t)} \times (t_{\delta,j} - t_{f2}) \quad (3.27)$$

и температуры внутренней $t_{0,j}$ (при $i = 0$) и наружной поверхностей стены $t_{\delta,j}$ (при $i = n$) определяются из соответствующих уравнений тепловых балансов для граничных слоёв стенки:

$$c(t) \times \rho \times s \times \frac{\partial t}{\partial \tau} = \alpha_1 \times (t_{f1} - t_{0,j}) + \lambda(t) \times \frac{\partial t}{\partial x}, \quad (3.28)$$

$$c(t) \times \rho \times s \times \frac{\partial t}{\partial \tau} = -\alpha_2 \times (t_{\delta,j} - t_{f2}) + \lambda(t) \times \frac{\partial t}{\partial x}, \quad (3.29)$$

где $s = \Delta x/2$ – толщина граничных слоёв; t_{f1} и t_{f2} – температуры окружающих сред, со стороны обогреваемой и необогреваемой поверхности, соответственно.

На основе этих уравнений (3.28) и (3.29) составляются балансовые конечно-разностные уравнения:

$$\frac{t_{0,j}-t_{0,j-1}}{\Delta\tau} = \frac{2\cdot\alpha_1}{c(t)\cdot\rho\cdot\Delta x} \times (t_{f1} - t_{0,j-1}) + \frac{2\cdot a(t)}{\Delta x^2} \times (t_{2,j-1} - t_{0,j-1}), \quad (3.30)$$

$$\frac{t_{n,j}-t_{n,j-1}}{\Delta\tau} = \frac{2\cdot\alpha_2}{c(t)\cdot\rho\cdot\Delta x} \times (t_{f2} - t_{n,j-1}) + \frac{2\cdot a(t)}{\Delta x^2} \times (t_{n,j-1} - t_{n,j-1}). \quad (3.31)$$

Как видно, решение уравнений (3.30) и (3.31) даёт возможность определить искомые температуры на границах стенки.

Температура на обогреваемой поверхности:

$$t_{0,j} = \frac{t_{1,j-1} + B(\bar{t}) \times t_{f1} + t_{0,j-1} \times \frac{1}{2 \times E(\bar{t})}}{1 + B(\bar{t}) + \frac{1}{2 \times E(\bar{t})}}. \quad (3.32)$$

$$\text{Здесь} \quad E(\bar{t}) = \frac{4 \times a(\bar{t}) \times \Delta\tau}{\Delta x^2}; \quad B(\bar{t}) = \frac{\alpha_1 \times \Delta x}{2 \times \lambda(\bar{t})}. \quad (3.33)$$

Все теплофизические свойства материала конструкции $[a(\bar{t}), \lambda(\bar{t}), c(\bar{t})]$ вычисляются по средней температуре:

$$\bar{t} = \frac{t_{1,j-1} + t_{0,j}}{2}. \quad (3.34)$$

Распределение температур по толщине ограждения для очередного временного шага τ_j можно рассчитать, используются следующие формулы:

$$t_{i,j} = E(\bar{t}) \times \left[t_{i-1,j} + t_{i+1,j-1} + t_{1,j-1} \times \left(\frac{1}{E(\bar{t})} - 2 \right) \right]. \quad (3.35)$$

В уравнении 3.35 значения коэффициента теплопроводности $\lambda(\bar{t})$ и коэффициент температуропроводности $a(\bar{t})$ зависит от средней температуры прогрева соответствующего слоя в данный интервал времени.

Температура на необогреваемой поверхности определяется уравнением:

$$t_{n,j} = t_{n-1,j} - \frac{\Delta x}{\lambda(\bar{t})} \times \alpha_2 \times \left(\frac{t_{n-1,j} - t_{f2}}{2} \right). \quad (3.36)$$

Средняя температура в данном случае определяется, как:

$$\bar{t} = \frac{t_{n,j-1} + t_{n-1,j}}{2}.$$

Совокупность разностных уравнений (3.32), (3.35) и (3.36), аппроксимирующих основное дифференциальное уравнение (3.19) и граничные условия (3.26) и (3.27), называют разностной схемой. Использование разностных

схем позволяет свести решение задачи для дифференциального уравнения к решению системы линейных алгебраических уравнений.

Данная схема является явной, так как температуры $t_{i,j}$ определяются по известным значениям $t_{i,j-1}$ из предыдущего расчётного момента времени.

Точность расчёта повышается при уменьшении $\Delta\tau$ и Δx , но их выбор не может быть независимым.

Значения $\Delta\tau$ и Δx для решения дифференциального уравнения теплопроводности (3.19) с граничными условиями третьего рода должны определяться из соответствующего условия устойчивости:

$$\frac{1}{\frac{a(t)}{\Delta x^2} + \frac{\alpha_{max}}{c(t) \times \rho \times \Delta x}} \leq 0,5, \quad (3.37)$$

где α_{max} – максимальный коэффициент теплоотдачи из α_1 и α_2 .

Примечание. Если значения $Bi = \frac{\alpha_1 \cdot \delta}{\lambda(\bar{t})}$ относительно малы ($Bi < 0.1 - 0.2$), то это означает, что температуру по толщине стенки можно принять одинаковой и соответственно отпадает необходимость в разбивке ее толщины на отдельные слои. Эта особенность реализуется при расчёте прогрева металлических конструкций, которая представлена далее.

3.2.2. Расчёт огнестойкости металлических несущих элементов строительных конструкций

Разработка инженерных методов расчёта огнестойкости основных несущих элементов имеет большое значение на стадии проектировании строительных конструкций различного назначения. Однако процесс расчёта не только трудоёмкий, но и имеет ряд особенностей, учёт которых обязателен и вызывает определённые сложности. Во-первых, сложность расчетов обусловлена разнообразием металлических профилей современных строительных конструкций, во-вторых – в условиях воздействия высоких

температур изменяются теплофизические свойства непосредственно самих несущих металлических элементов конструкций, а также огнезащитных материалов. Таким образом, создание инженерных методов расчетов на основании простых расчётных формул и несложных вычислений дают результаты с не достаточной для практики точностью. Поэтому одним из вариантов решения данной проблемы может являться применение методов моделирования в строительной теплофизике и использование вычислительной техники.

Расчётный метод определения фактического предела огнестойкости строительной конструкции на основе исходных данных используется, как правило, в ситуациях, когда проведение огневых испытаний невозможно. Кроме этого, расчётный метод во много раз более экономичен и даёт возможность проверки различных вариантов решения.

Расчёт включает в себя две части: статическую (прочностную) и теплотехническую задачи.

При решении статической задачи определяют критическую для данной конструкции температуру $t_{кр}$, при которой конструкция теряет способность сопротивляться нагрузке.

При теплотехническом расчёте определяется время прогрева конструкции до заданной критической температуры.



Рисунок 3.1 – Схема расчёта фактического предела огнестойкости

Решение прочностной задачи (нахождение критической температуры) осуществляется в зависимости от профиля металлического элемента, его геометрических размеров, формы, площади поперечного сечения, схемы и периметра обогрева сечения элемента, метода крепления, условий работы, величины нормативной нагрузки и марки стали.

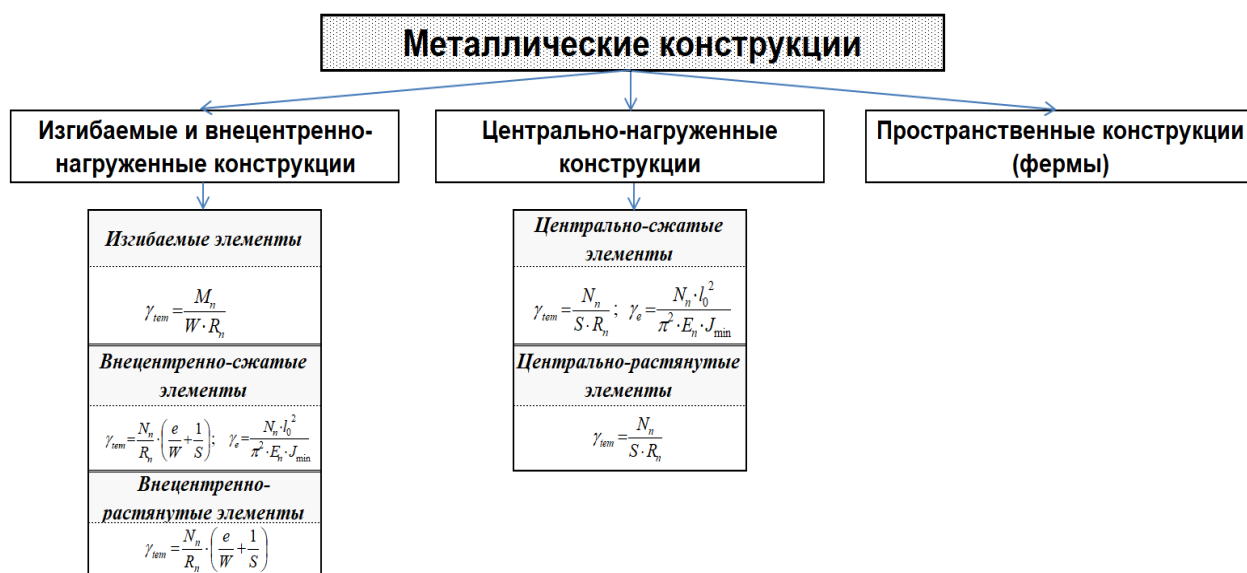


Рисунок 3.2 – Расчёт коэффициентов γ_{tem} и γ_e , в зависимости от условий применения конструкции

В формулах представленных в блок-схеме параметры означают: γ_{tem} – коэффициент учитывающий изменение нормативного сопротивления R_n стали; γ_e – коэффициент учитывающий изменение модуля упругости E стали; M_n – максимальный изгибающий момент от действия нормативной нагрузки, кг·см; N_n – нормативная нагрузка, кг; W – пластический момент сопротивления сечения, см³; e – эксцентриситет приложения нормативной нагрузки, см; J_{min} – наименьший момент инерции сечения элемента, см⁴; S – площадь поперечного сечения элемента, см²; l – длина элемента, см; l_0 – расчётная длина элемента, см.

Пластический момент сопротивления сечения определяется из соотношения:

$$W = W_0 \times D,$$

где W_0 – момент сопротивления сечения, $см^3$; D – коэффициент развития пластических деформаций.

При расчётах пределов огнестойкости значения коэффициента D следует принимать равными:

- для прямоугольного сечения – 1,5;
- для двутавров и швеллеров – 1,17;
- для труб – 1,25.

Расчётная длина элемента l_0 рассчитывается по формуле:

$$l_0 = C \cdot l;$$

Здесь коэффициент C в зависимости от способа крепления принимается равным:

- жёсткое опирание (защемление по концам) – $C = 0,5$;
- жёсткое опирание одной опоры и шарнирное опирание другой – $C = 0,7$;
- консольное (один конец защемлён, другой свободен) – $C = 2$;
- шарнирное опирание сжатого элемента (по концам) – $C = 1$.

Критическая температура определяется в зависимости от значений коэффициентов γ_{tem} и γ_e , учитывающих изменения нормативного сопротивления и модуля упругости стали в зависимости от температуры (см. табл. 3.1):

– для изгибаемых элементов критическая температура определяется по табл. 3.1 в зависимости от коэффициента γ_{tem} ;

– для внецентренно-сжатых элементов критическая температура определяется как наименьшая величина из двух найденных по табл. 3.1 значений в зависимости от коэффициентов γ_{tem} и γ_e ;

– для внецентренно-растянутых элементов критическая температура определяется по таблице 3.1 в зависимости от коэффициентов γ_{tem} ;

– для центрально-сжатых элементов критическая температура определяется как наименьшая величина из двух найденных по табл. 3.1 значений в зависимости от коэффициентов γ_{tem} и γ_e ;

– для центрально-растянутых элементов критическая температура определяется по табл. 3.1 в зависимости от коэффициентов γ_{tem} ;

– в случае пространственных конструкций (ферм) предел огнестойкости определяется по потере несущей способности наиболее слабой с точки зрения огнестойкости элемента.

Таблица 3.1 Значения коэффициентов γ_{tem} и γ_e , учитывающих изменения нормативного сопротивления и модуля упругости стали в зависимости от температуры

$t_{кр}, C^{\circ}$	γ_{tem}	γ_e	$t_{кр}, C^{\circ}$	γ_{tem}	γ_e
20	1,0	1,0	400	0,70	0,86
100	0,99	0,96	450	0,65	0,84
150	0,93	0,95	500	0,58	0,80
200	0,85	0,94	550	0,45	0,77
250	0,81	0,92	600	0,34	0,72
300	0,77	0,90	650	0,22	0,68
350	0,74	0,88	700	0,11	0,59

В основе теплотехнического расчёта лежат уравнения нестационарной теплопроводности твёрдого тела.

А) Если строительная конструкция представляет собой *незащищённую* металлическую конструкцию или конструкцию с тонкослойным огнезащитным покрытием, то уравнение для расчёта прогрева имеет вид:

$$c(t) \times \rho \times \delta_{пр} \times \frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{t_f(\tau) - t(\tau)}{R}.$$

Здесь $\delta_{пр}$ – приведённая толщина металлической конструкции определяемая по формуле:

$$\delta_{пр} = \frac{S}{U},$$

где S – площадь поперечного сечения конструкции, m^2 ; U – обогреваемый периметр сечения металлической конструкции, м (*поверхности металлических конструкций, примыкающие к плитам, настилам перекрытий и стенам,*

не учитываются при определении обогреваемой части периметра сечения) рассчитываются по формулам, представленным в табл. 3.2;

R – термическое сопротивление между греющей средой и непосредственно металлической конструкцией, которое определяется по формулам:

– в случае незащищённой металлической конструкции:

$$R = \frac{1}{\alpha(\tau)} ;$$

– в случае конструкции с тонкослойными огнезащитными покрытиями:

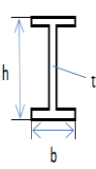
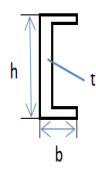
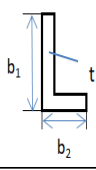
$$R = \frac{1}{\alpha(\tau)} + \frac{\delta_z}{\lambda_z(\tau)} .$$

Здесь $\alpha(\tau)$, Вт/(м² × °С) – коэффициент теплообмена между поверхностью конструкции и продуктами горения.

Решить задачу по оценке огнестойкости строительных конструкций означает найти распределение температуры во времени исследуемого объекта с учётом меняющихся теплофизических свойств материалов от температуры и при нестационарном тепловом потоке.

В практической деятельности, как правило, применяют численные методы, которые применимы для тел любой конфигурации, с переменными граничными условиями и зависящих от – температуры теплофизических свойств материала объекта исследования. При решении теплофизических задач наибольшее применение получил такой численный метод, как метод конечных разностей. Сущность метода конечных разностей состоит в замене дифференциального уравнения его конечно-разностным аналогом, причём непрерывное распределение температуры в теле заменяется ступенчатым как в пространстве, так и во времени.

Таблица 3.2 – Формулы для расчёта площади поперечного сечения и периметра конструкции в зависимости от профиля и схемы опирания

Профиль	3-ая цифра варианта	Схема опирания		Формула расчета сечения элемента	Формула расчета обогреваемой части периметра сечения
	0		10	$S = t \cdot (h - 2 \cdot t) + 2 \cdot t \cdot b$	$U = 2 \cdot (h + 2 \cdot b - t)$
	1		16		$U = 2 \cdot h + 3 \cdot b - 2 \cdot t$
	2		18		$U = h + 2 \cdot b - t$
	3		24		$U = h + b - t$
	4		8	$S = t \cdot (h + 2 \cdot b - 2 \cdot t)$	$U = h + 3 \cdot b - 2 \cdot t$
	5		14		$U = h + 4 \cdot b - 2 \cdot t$
	6		20		$U = h + 3 \cdot b - t$
	7		22		$U = h + 2 \cdot b$
	8		5	$S = b_1 \cdot t + (b_2 - t) \cdot t$	$U = b_1 + b_2$
	9		11		$U = 2 \cdot b_2 + b_1$

Заменяя дифференциалы в уравнении конечными приращениями, для этого выбирается расчётный интервал по времени $\Delta \tau$. Индекс « i » ($i = 0, 1, 2, \dots, k$) характеризует температуру в расчётный момент времени $t(\tau_i)$.

Наиболее просто решаются конечно-разностные уравнения соответствующие явной схеме. Смысл явной схемы заключается в том, что при нахождении температур в любой момент времени используются уже известные значения температур с предыдущего момента времени, т.е. осуществляется последовательное решение уравнений с одним неизвестным (искомой температурой).

Разностное уравнение аппроксимирующее основное дифференциальное уравнение имеет вид:

$$t(\tau_i) = \frac{\alpha(\tau_i) \times t_f(\tau_i) + \frac{c(\bar{t}) \times \gamma \times \delta_{\text{пр}} \times t(\tau_{i-1})}{\Delta\tau}}{\alpha(\tau_i) + \frac{c(\bar{t}) \times \gamma \times \delta_{\text{пр}}}{\Delta\tau}}.$$

Для решения данного уравнения необходимо задать начальные и граничные условия (краевые условия), характеризующие каждую конкретную задачу.

Так, в случае равномерного прогрева объекта толщиной δ в условиях внутреннего пожара, в качестве начального условия принимается $t(0) = t_0$, а граничные условия на обогреваемой поверхности – коэффициент теплообмена $\alpha(\tau)$ между продуктами горения с температурой $t_f(\tau)$ и температурой металлической конструкции в момент времени $\tau - t(\tau)$.

Коэффициент теплообмена $\alpha(\tau)$ между поверхностью конструкции и продуктами горения, рассчитывается по формуле:

$$\alpha(\tau) = 29 + \frac{C_0 \times \varepsilon_{\text{пр}} \times \left[\left(\frac{\bar{T}_f(\tau)}{100} \right)^4 - \left(\frac{\bar{T}(\tau)}{100} \right)^4 \right]}{\bar{T}_f(\tau) - \bar{T}(\tau)},$$

где

$$\varepsilon_{\text{пр}} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1}.$$

Здесь $\bar{T}_f(\tau) = 273 + t_f(\tau); K; \bar{T}(\tau) = 273 + t(\tau); K, C_0 = 5,67 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \times \text{K}^4); \varepsilon_1 - \text{степень черноты пламени}; \varepsilon_2 - \text{степень черноты обогреваемой поверхности конструкции}.$

Б) Если строительная конструкция представляет собой *конструкцию с огнезащитой* в виде: облицовки плитными, листовыми и другими огнеупорными материалами; нанесения штукатурки; применения различных

толстослойных напыляемых составов и т.д., то уравнение и краевые условия для расчёта прогрева имеет вид:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a(t) \times \frac{\partial^2 t}{\partial x^2}.$$

Граничные и начальные условия записываются соответственно следующим образом:

$$\left. \frac{\partial t_z}{\partial x} \right|_{x=0} = -\frac{\alpha(\tau)}{\lambda_z(t_z)} \times [t_z - t_f], \quad t_z|_{x=0} = t_0.$$

Данная задача решается методом конечных разностей, который пригоден для тел любой конфигурации, неоднородных с переменными граничными условиями и зависимых от температуры теплофизических свойств материалов.

При расчёте температурного поля конструкции, состоящей из слоя огнезащиты и металлической основы, то слой огнезащитного покрытия δ_z разбивается на n слоёв одинаковой толщины Δx , в которых учитываются изменения теплофизических свойств от температуры.

Использование неявной разностной схемы позволяет осуществить решение поставленной задачи с помощью решения системы линейных алгебраических уравнений.

$$\left\{ \begin{array}{l} t_z(1, \tau_i) = \frac{\left[\alpha(\tau_i) + \frac{\lambda_z(\tau_i)}{2 \times \Delta x} \right] \times t_f(\tau_i) + \frac{\lambda_z(\tau_i)}{\Delta x} \times t(2, \tau_i)}{\alpha(\tau_i) + \frac{3 \times \lambda_z(\tau_i)}{2 \times \Delta x}} \\ t_z(2, \tau_i) = t_z(2, \tau_{i-1}) + a_z(\tau_i) \times \frac{\Delta \tau}{\Delta x^2} \times [t_z(1, \tau_i) + t_z(3, \tau_i)] \\ \dots \dots \dots \\ t_z(n, \tau_i) = t_z(n, \tau_{i-1}) + a_z(\tau_i) \times \frac{\Delta \tau}{\Delta x^2} \times [t_z(n-1, \tau_i) + t(\tau_i)] \\ t(\tau_i) = \frac{\frac{\lambda_z(\tau_i)}{2 \times \Delta x} \times t_z(n, \tau_i) + c(\tau_i) \times \gamma \times \Delta x \times t(\tau_{i-1})}{c(\tau_i) \times \gamma \times \Delta x + \frac{\lambda_z(\tau_i)}{2 \times \Delta x}} \end{array} \right.$$

Здесь $t_z(1, \tau_i), t_z(2, \tau_i), \dots, t_z(n, \tau_i)$ – распределение температур по толщине огнезащитного покрытия в момент времени τ , а $t_z(1, \tau_{i-1}), t_z(2, \tau_{i-1}), \dots, t_z(n, \tau_{i-1})$ – распределение температур в предыдущий момент времени; $t_f(\tau_i)$ – среднеинтегральная температура греющей среды в момент времени τ_i , °C; $t(\tau_i)$ – температура металлической конструкции в момент времени τ_i , °C; $c(\tau_i)$ – теплоёмкость материала металлической конструкции, Дж/(кг·°C); γ – плотность материала конструкции, кг/м³; δ_{np} – приведённая толщина металлической конструкции, м; δ_z – толщина огнезащитного покрытия, м; $\lambda_z(\tau_i)$ – коэффициент теплопроводности огнезащитного покрытия, Вт/(м² × °C); $a_z(\tau_i)$ – коэффициент температуропроводности огнезащитного покрытия, м²/с.

Ввиду того, что в условиях пожара изменение температур происходит в широком диапазоне значений, то при расчётах все теплофизические свойства материалов конструкций вычисляются по соответствующим средним температурам пространственных слоёв для каждого временного интервала.

В качестве начальной температуры по сечению конструкции принимается температура окружающей среды до возникновения пожара t_0 .

В) Расчёт фактического предела огнестойкости конструкций, защищённых *тонкослойным вспучивающимся покрытием*, вызывает определённые сложности из-за необходимости определения в нестационарном режиме коэффициента теплопроводности вспученного слоя.

3.3. Выбор расчётных схем развития пожара

Время возникновения опасных для человека ситуаций при пожаре в помещении зависит от вида горючих веществ и материалов и площади горения, которая, в свою очередь, обуславливается свойствами самих материалов, а также способом их укладки и разрешения. Каждая расчётная схема развития пожара в помещении характеризуется значениями двух параметров A и n , которые зависят

от формы поверхности горения, характеристик горючих веществ и материалов и определяются следующим образом:

1. Для горения легковоспламеняющихся и горючих жидкостей, разлитых на площади F :

– при горении жидкости с установившейся скоростью (характерно для легкоиспаряющихся жидкостей):

$$A = \psi, \quad n = 1;$$

– при горении жидкости с неустановившейся скоростью:

$$A = 0,67 \times \psi \times F \times \sqrt{\tau_{\text{ст}}}, \quad n = 1,5;$$

2. Для кругового распространения пламени по поверхности равномерно распределенного в горизонтальной плоскости горючего материала:

$$A = 1,05 \times \psi \times v^2, \quad n = 3;$$

3. Для вертикальной или горизонтальной поверхности горения в виде прямоугольника, одна из сторон которого увеличивается в двух направлениях за счёт распространения пламени:

$$A = \psi \times v \times b, \quad n = 2;$$

4. Для вертикальной поверхности горения, имеющей форму прямоугольника (горение занавеса, одиночных декораций, горючих отделочных или облицовочных материалов стен при воспламенении снизу до момента достижения пламенем верхнего края материала):

$$A = 0,67 \times \psi \times V_{\Gamma} \times V_{\text{В}}, \quad n = 3;$$

5. Для поверхности горения, имеющей форму цилиндра (горение пакета декораций или тканей, размещённых с некоторым зазором):

$$A = 2,09 \times \psi \times V_{\Gamma} \times V_{\text{В}}, \quad n = 3.$$

В этих формулах:

n – показатель степени, учитывающий изменение массы выгорающего материала во времени;

ψ – удельная установившаяся массовая скорость выгорания жидкости, $\text{кг} \times \text{м}^{-2} \text{ с}^{-1}$;

v – линейная скорость распространения пламени;

ψ – удельная массовая скорость выгорания;

V_{Γ} и $V_{\text{В}}$ – средние значения горизонтальной и вертикальной скорости распространения пламени по поверхности материала, $\text{м} \cdot \text{с}^{-1}$;

$\tau_{\text{ст}}$ – время установления стационарного режима выгорания жидкости, с;

b – ширина фронта пламени (принимается равной ширине помещения).

4. ПРИМЕРЫ ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИХ РАСЧЕТОВ В ОБЕСПЕЧЕНИИ ПОЖАРНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

4.1. Расчёт среднеобъёмной температуры продуктов горения при свободно развивающемся пожаре в помещении

В качестве объекта исследования выбрано помещение почты с размерами $10 \times 16 \times 4$ м, при наличии двух окон ($2 \times 1,6$ м, координата нижнего края проёма – 1 м) и дверного проёма ($2,1 \times 1,8$ м). Общее количество пожарной нагрузки $M_{\text{пн}}$ составляет 4 000 кг. Параметры пожарной нагрузки для моделирования динамики опасных факторов пожара принимаются по справочным данным приведённым в Приложении В. Температура в помещении до пожара t_0 равна температуре внешней среды – 20°C .

Алгоритм расчёта среднеобъёмной температуры продуктов горения в условиях объемного пожара выглядит следующим образом:

1) Определяется режим наиболее вероятного развития пожара:

– рассчитывается объём помещения V :

$$V = 10 \times 16 \times 4 = 640 \text{ м}^3 ;$$

– рассчитывается площадь пола S :

$$S = 10 \times 16 = 160 \text{ м}^2 ;$$

– определяется площадь каждого проёма помещения A_i (м^2):

$$A_1 = 2 \times 1,6 = 3,2 \text{ м}^2; \quad A_2 = 2 \times 1,6 = 3,2 \text{ м}^2; \quad A_3 = 2,1 \times 1,8 = 3,78 \text{ м}^2;$$

– определяется суммарную площадь проёмов:

$$A = \sum A_i = 3,2 + 3,2 + 3,78 = 10,18 \text{ м}^2 ;$$

– определяется приведённую высоту проёмов помещения h_{np} :

$$h_{\text{пр}} = \frac{\sum A_i \times h_i}{A} = \frac{3,2 \times 1,6 + 3,2 \times 1,6 + 3,78 \times 1,8}{10,18} = 1,67 \text{ м};$$

– рассчитывается проёмность Π помещения:

– так как $V < 10^3 \text{ м}^3$, то:

$$\Pi = \frac{\sum A_i \times h_i^{0,5}}{V^{0,66}} = \frac{3,2 \times 1,265 + 3,2 \times 1,265 + 3,78 \times 1,34}{71,13} = 0,18 \text{ м}^{0,5};$$

– количество воздуха, необходимое для сгорания 1 кг материала данной пожарной нагрузки, в первом приближении считаем равным:

$$V_0 = 5,6 \frac{\text{кг}}{\text{кг}};$$

– определяется удельное критическое количество пожарной нагрузки $q_{\text{кр}}$ для исследуемого помещения:

$$q_{\text{кр}} = \frac{4500 \times \Pi^3}{1 + 500 \times \Pi^3} + \frac{V^{0,33}}{6 \times V_0} = \frac{4500 \times 0,00583}{1 + 500 \times 0,00583} + \frac{8,434}{6 \times 5,6} = 6,9 \frac{\text{кг}}{\text{м}^2};$$

– вычисляется количество пожарной нагрузки q_s , отнесённое к площади пола помещения:

$$q_s = \frac{M_{\text{пн}}}{S} = \frac{4\,000}{160} = 25 \frac{\text{кг}}{\text{м}^2};$$

– вычисляется удельное значение пожарной нагрузки q , отнесённое к площади тепловоспринимающей поверхностей помещения:

$$q = \frac{M_{\text{пн}} \times Q_{\text{н}}^{\text{p}}}{(6 \times V^{0,66} - A) \times Q_{\text{нг}}^{\text{p}}} = \frac{4\,000 \times 20,7}{(6 \times 71,13 - 10,2) \times 13,8} = 13,8 \frac{\text{кг}}{\text{м}^2};$$

– сравниваются значения $q_{\text{кр}}$ и q :

так как $q \geq q_{\text{кр}}$, то в помещении пожар, *регулируемый вентиляцией (ПРВ)* и, следовательно:

– время достижения максимального значения среднеобъёмной температуры τ_{max} определяется по формуле:

$$\tau_{max} = \frac{M_{пн} \cdot Q_H^p}{6285 \cdot A \cdot \sqrt{h_{пр}}} \times \frac{\psi_g}{\psi} = \frac{4000 \times 20,7 \times 0,014}{6285 \times 10,18 \times 1,29 \times 0,018} = 0,77 \text{ час}$$

или

$$\tau_{max} = 46,7 \text{ мин.}$$

– значение максимальной среднеобъёмной температуры t_{max} с точностью до 5 %:

$$t_{max} = 940 \times e^{4,7 \times 10^{-3} \times (q_s - 30)} = 940 \times 2,71^{0,00475 \times (25 - 30)} = 918 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

2) На основе полученных значений τ_{max} и t_{max} определяется изменение среднеобъёмной температуры во времени при объёмном свободно развивающемся пожаре:

$$t_f(\tau) = t_0 + (t_{max} - t_0) \times 115,6 \times \left(\frac{\tau_i}{\tau_{max}} \right)^{4,75} \times e^{-4,75 \times \left(\frac{\tau_i}{\tau_{max}} \right)},$$

где τ – текущее время, мин.

Расчётный интервал времени $\Delta\tau$ определяется из соотношения:

$$\Delta\tau = \frac{\tau_{max}}{5} = \frac{46,7}{5} = 9,33 \text{ мин.}$$

Для удобства расчетов и построения графика предлагается численное значение $\Delta\tau$ округлять до ближайшего целого значения, т.е.

$$\Delta\tau = 9 \text{ мин.}$$

Тогда:

$$\tau_1 = 9 \text{ мин.}; \tau_2 = 18 \text{ мин.}; \tau_3 = 27 \text{ мин.}; \tau_4 = 36 \text{ мин.}; \tau_5 = 45 \text{ мин.}; \tau_6 = 54 \text{ мин.}; \tau_7 = 63 \text{ мин.}; \tau_8 = 72 \text{ мин.}$$

$$t_f(\tau_1) = 20 + (918 - 20) \times 115,6 \times \left(\frac{9}{46,7}\right)^{4,75} \times e^{-4,75 \times \left(\frac{9}{46,7}\right)} = 39 \text{ } ^\circ\text{C} ;$$

$$t_f(\tau_2) = 20 + (918 - 20) \times 115,6 \times \left(\frac{18}{46,7}\right)^{4,75} \times e^{-4,75 \times \left(\frac{18}{46,7}\right)} = 201 \text{ } ^\circ\text{C} ;$$

$$t_f(\tau_3) = 20 + (918 - 20) \times 115,6 \times \left(\frac{27}{46,7}\right)^{4,75} \times e^{-4,75 \times \left(\frac{27}{46,7}\right)} = 518 \text{ } ^\circ\text{C} ;$$

$$t_f(\tau_4) = 20 + (918 - 20) \times 115,6 \times \left(\frac{36}{46,7}\right)^{4,75} \times e^{-4,75 \times \left(\frac{36}{46,7}\right)} = 804 \text{ } ^\circ\text{C} ;$$

$$t_f(\tau_5) = 20 + (918 - 20) \times 115,6 \times \left(\frac{45}{46,7}\right)^{4,75} \times e^{-4,75 \times \left(\frac{45}{46,7}\right)} = 928 \text{ } ^\circ\text{C} ;$$

$$t_f(\tau_6) = 20 + (918 - 20) \times 115,6 \times \left(\frac{54}{46,7}\right)^{4,75} \times e^{-4,75 \times \left(\frac{54}{46,7}\right)} = 886 \text{ } ^\circ\text{C} ;$$

$$t_f(\tau_7) = 20 + (918 - 20) \times 115,6 \times \left(\frac{63}{46,7}\right)^{4,75} \times e^{-4,75 \times \left(\frac{63}{46,7}\right)} = 743 \text{ } ^\circ\text{C} ;$$

$$t_f(\tau_8) = 20 + (918 - 20) \times 115,6 \times \left(\frac{72}{46,7}\right)^{4,75} \times e^{-4,75 \times \left(\frac{72}{46,7}\right)} = 567 \text{ } ^\circ\text{C} ;$$

Результаты проведённых расчетов представлены в табл. 4.1 и 4.2:

Таблица 4.1 – Результаты расчетов

Общий объём помещения, V [м ³]	640
Площадь помещения, S [м ²]	160
Суммарная площадь проёмов, A [м ²]	10,2
Приведённая высота проёмов помещения, $h_{пр}$ [м]	1,67
Проёмность помещения, Π [м]	0,18
Общая пожарная нагрузка, $M_{пн}$ [кг]	4 000
Кол-во пожарной нагрузки, отнесенное к площади пола помещения q_s [кг/м ²]	25
Удельное критическое кол-во пожарной нагрузки, $q_{кр}$ [кг/м ²]	6,9
Кол-во пожарной нагрузки, отнесённое к площади тепловоспринимающих поверхностей помещения q [кг/м ²]	13,8
Время достижения максимального значения среднеобъёмной темп-ры, τ_{max} [мин.]	46,7
Максимальное значение среднеобъёмной темп-ры (<i>с точностью до 5%</i>), t_{max} [°C]	918 ± 5 %
Режим пожара	ПРВ

Таблица 4.2 – Результаты расчетов

Время, τ [мин.]	0	9	18	27	36	45	54	63	72
Среднеобъемная температура, $t_f(\tau)$ [°C]	20	39	201	518	804	928	886	743	567

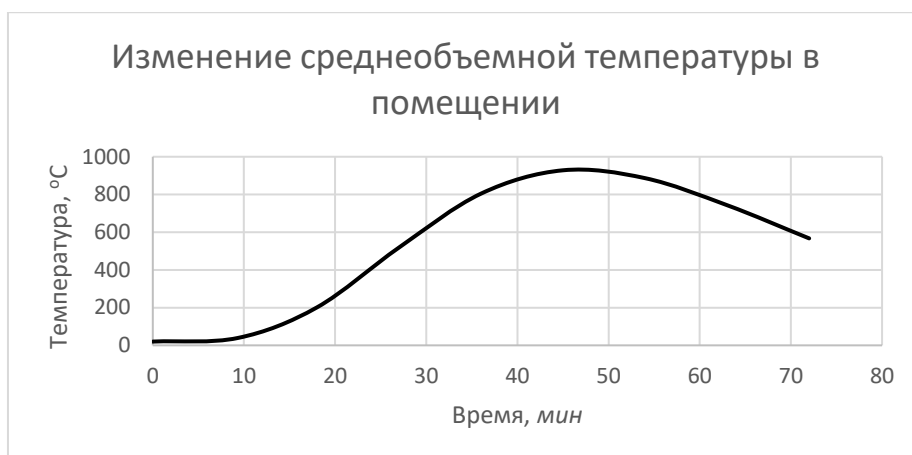


Рисунок 4.1 – Изменение среднеобъемной температуры продуктов горения во времени

4.2. Расчёт расходов поступающего воздуха и газовой среды, удаляемой из помещения

Для расчёта динамики изменения значений притока воздуха и оттока продуктов горения через проёмы в условиях внутреннего пожара используем данные объекта исследования и результаты расчёта $[t(\tau_i)$ и $\tau_i]$ из примера расчёта среднеобъемной температуры продуктов горения при свободно развивающемся пожаре в помещении (см. п.п. 4.1):

$$\tau = \{9 \text{ мин.}; 18 \text{ мин.}; 27 \text{ мин.}; 36 \text{ мин.}; 45 \text{ мин.}; 54 \text{ мин.}; 63 \text{ мин.}; 72 \text{ мин.}\}$$

и

$$t_f = \{39 \text{ }^{\circ}\text{C}; 518 \text{ }^{\circ}\text{C}; 804 \text{ }^{\circ}\text{C}; 886 \text{ }^{\circ}\text{C}; 928 \text{ }^{\circ}\text{C}; 743 \text{ }^{\circ}\text{C}; 567 \text{ }^{\circ}\text{C}\}.$$

Исходя из установочных данных, следует, что:

- высота оконного проёма $h_{np}=1,6 \text{ м};$
- суммарная площадь оконных проемов $F_{np}=2 \cdot 1,6 \cdot 2=6,4 \text{ м}^2;$
- $F_1= F_{np}/3=6,4/3=2,13 \text{ м}^2;$
- координата нижнего края оконного проема $y_n=1 \text{ м};$

– координата верхнего края оконного проема $y_v = 2,6$ м.

Для проведения дальнейших расчетов необходимо с начала определиться со значением удельной газовой постоянной R продуктов горения.

Так как, не известен количественный состав газовой среды (продуктов горения), то значение удельной газовой постоянной R принимается равным значению удельной газовой постоянной для азота:

$$R = \frac{8314}{\mu_{N_2}}.$$

где $\mu_{N_2} = 28$ кг/кмоль – молекулярная масса азота.

$$R = \frac{8314}{28} = 297 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \times \text{К}},$$

Определяемся со значением плотности атмосферного воздуха ρ в зависимости от температуры из справочной литературы (см. Приложение Б):

– плотность воздуха при температуре $t_0 = 20^\circ\text{C}$ – $\rho = 1,205$ кг/м³.

Ввиду того, что отток продуктов горения из помещения напрямую зависит от координаты положения нейтральной зоны (НЗ), а она в условиях пожара меняется, то необходимо для каждого момента времени определить положение НЗ.

1. $\tau_1 = 9$ мин :

– рассчитываем значение плотности газовой среды при температуре газовой среды в помещении $t_f(\tau_1) = 39^\circ\text{C}$ (см. Приложение А), используя метод линейной интерполяции:

$$\rho_m(\tau_1) = 1,295 + \frac{(0,95 - 1,295)}{(100 - 0)} \times (39 - 0) = 1,16 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}.$$

– рассчитываем среднеобъёмное давление газовой среды в помещении P_m из уравнения Клапейрона-Менделеева:

$$P_m(\tau_1) = \rho_m(\tau_1) \times T_f(\tau_1) \times R.$$

Здесь $T_f(\tau_1) = 39 + 273 = 312 \text{ K}$.

$$P_m(\tau_1) = 1,16 \times 312 \times 297 = 107\,506 \text{ Па}.$$

Значение координаты НЗ определяем по формуле:

$$Y(\tau_1) = h - \frac{P_m(\tau_1) - P}{g \times [\rho - \rho_m(\tau_1)] \times 1\,000}.$$

Здесь h – 1/2 высоты помещения; $P=101325$ Па – атмосферное давление.

$$Y(\tau_1) = 2 - \frac{107\,506 - 101\,325}{9,8 \times [1,205 - 1,16] \times 1\,000} = -9,16 \text{ м}.$$

В зависимости от расположения проёма относительно НЗ ($Y(\tau_1) < y_n$ – режим выталкивания):

– приток воздуха через весь проем $G = 0$.

– отток продуктов горения:

$$G_m = \frac{2}{3} \times \beta \times F_{\text{пр}} \times \sqrt{2 \times g \times h_{\text{пр}} \times \rho_m(\tau_1) \times [\rho - \rho_m(\tau_1)]} =$$
$$= 0,66 \times 0,65 \times 6,4 \times \sqrt{2 \times 9,8 \times 1,6 \times 1,16 \times [1,205 - 1,16]} = 3,5 \frac{\text{кг}}{\text{с}}.$$

1. $\tau_2 = 18 \text{ мин}$:

– плотность газовой среды при температуре газовой среды помещения t_f (τ_2) = 201 °C:

$$\rho_m(\tau_2) = 0,748 + \frac{(0,617 - 0,748)}{(300 - 200)} \times (201 - 200) = 0,748 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}.$$

– среднеобъёмное давление газовой среды:

$$P_m(\tau_2) = \rho_m(\tau_2) \times T_f(\tau_2) \times R.$$

Здесь $T_f(\tau_2) = 201 + 273 = 474 \text{ K}$.

$$P_m(\tau_2) = 0,748 \times 474 \times 297 = 105\,092 \text{ Па}.$$

– значение координаты НЗ определяем по формуле:

$$Y(\tau_2) = 2 - \frac{105\,092 - 101\,325}{9,8 \times [1,205 - 0,748] \times 1\,000} = 1,2 \text{ м}.$$

В зависимости от расположения проёма относительно НЗ ($y_n < Y(\tau_2) < y_g$ – смешанный режим):

– приток воздуха:

$$G = \frac{2}{3} \times \beta \times F_1 \times \sqrt{2 \times g \times [Y(\tau_2) - y_H] \times \rho \times [\rho - \rho_m(\tau_2)]} =$$

$$= 0,66 \times 0,65 \times 2,13 \times \sqrt{2 \times 9,8 \times [1,2 - 1] \times 1,205 \times [1,205 - 0,748]} = 1,45 \frac{\text{кг}}{\text{с}} ;$$

– отток продуктов горения определяется по формуле:

$$G_m = \frac{2}{3} \times \beta \times (F_{\text{пр}} - F_1) \times \sqrt{2 \times g \times [y_B - Y(\tau_2)] \times \rho_m(\tau_2) \times [\rho - \rho_m(\tau_2)]} =$$

$$= 0,66 \times 0,65 \times (6,4 - 2,13) \sqrt{2 \times 9,8 \times [2,6 - 1,2] \times 0,748 \times [1,205 - 0,748]} = 5,56 \frac{\text{кг}}{\text{с}} .$$

2. $\tau_3 = 27$ мин:

- плотность газовой среды при температуре газовой среды помещении t_f

$(\tau_3) = 518$ °C:

$$\rho_m(\tau_3) = 0,457 + \frac{(0,405 - 0,457)}{(600 - 500)} \times (518 - 500) = 0,447 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} ;$$

– среднеобъёмное давление газовой среды:

$$P_m(\tau_3) = \rho_m(\tau_3) \times T_f(\tau_3) \times R .$$

Здесь $T_f(\tau_3) = 518 + 273 = 791$ K .

$$P_m(\tau_3) = 0,447 \times 791 \times 297 = 105\,137 \text{ Па} .$$

– значение координаты НЗ определяем по формуле:

$$Y(\tau_3) = 2 - \frac{105\,137 - 101\,325}{9,8 \times [1,205 - 0,447] \times 1\,000} = 1,5 \text{ м} .$$

В зависимости от расположения проёма относительно НЗ ($y_H < Y(\tau_3) < y_B$ – смешанный режим):

– приток воздуха:

$$G = \frac{2}{3} \times \beta \times F_1 \times \sqrt{2 \times g \times [Y(\tau_3) - y_H] \times \rho \times [\rho - \rho_m(\tau_3)]} =$$

$$= 0,66 \times 0,65 \times 2,13 \times \sqrt{2 \times 9,8 \times [1,5 - 1] \times 1,205 \times [1,205 - 0,447]} = 2,8 \frac{\text{кг}}{\text{с}} ;$$

– отток продуктов горения определяется по формуле:

$$G_m = \frac{2}{3} \times \beta \times (F_{\text{пр}} - F_1) \times \sqrt{2 \times g \times [y_{\text{в}} - Y(\tau_3)] \times \rho_m(\tau_3) \times [\rho - \rho_m(\tau_3)]} =$$

$$= 0,66 \times 0,65 \times (6,4 - 2,13) \sqrt{2 \times 9,8 \times [2,6 - 1,5] \times 0,447 \times [1,205 - 0,447]} = 5,5 \frac{\text{кг}}{\text{с}}.$$

3. $\tau_4 = 36$ мин:

– плотность газовой среды при температуре газовой среды помещения t_f (τ_4) = 804 °C:

$$\rho_m(\tau_4) = 0,33 + \frac{(0,301 - 0,33)}{(900 - 800)} \times (804 - 800) = 0,328 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3};$$

– среднеобъёмное давление газовой среды:

$$P_m(\tau_4) = \rho_m(\tau_4) \times T_f(\tau_4) \times R.$$

Здесь $T_f(\tau_4) = 804 + 273 = 1\,077 \text{ K}$.

$$P_m(\tau_4) = 0,328 \times 1\,077 \times 297 = 105\,160 \text{ Па}.$$

– значение координаты НЗ определяем по формуле:

$$Y(\tau_4) = 2 - \frac{105\,160 - 101\,325}{9,8 \times [1,205 - 0,328] \times 1\,000} = 1,5 \text{ м}.$$

В зависимости от расположения проёма относительно НЗ ($y_{\text{н}} < Y(\tau_4) < y_{\text{в}}$ – смешанный режим):

– приток воздуха:

$$G = \frac{2}{3} \times \beta \times F_1 \times \sqrt{2 \times g \times [Y(\tau_4) - y_{\text{н}}] \times \rho \times [\rho - \rho_m(\tau_4)]} =$$

$$= 0,66 \times 0,65 \times 2,13 \times \sqrt{2 \times 9,8 \times [1,5 - 1] \times 1,205 \times [1,205 - 0,328]} = 3,0 \frac{\text{кг}}{\text{с}};$$

– отток продуктов горения определяется по формуле:

$$G_m = \frac{2}{3} \times \beta \times (F_{\text{пр}} - F_1) \times \sqrt{2 \times g \times [y_{\text{в}} - Y(\tau_4)] \times \rho_m(\tau_4) \times [\rho - \rho_m(\tau_4)]} =$$

$$= 0,66 \times 0,65 \times (6,4 - 2,13) \sqrt{2 \times 9,8 \times [2,6 - 1,5] \times 0,328 \times [1,205 - 0,328]} = 4,5 \frac{\text{кг}}{\text{с}}.$$

– $\tau_5 = 45$ мин:

– плотность газовой среды при температуре газовой среды помещения t_f (τ_5) = 928 °C:

$$\rho_m(\tau_5) = 0,301 + \frac{(0,235 - 0,301)}{(1\,000 - 900)} \times (928 - 900) = 0,285 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3};$$

– среднеобъёмное давление газовой среды:

$$P_m(\tau_5) = \rho_m(\tau_5) \times T_f(\tau_5) \times R.$$

Здесь $T_f(\tau_5) = 928 + 273 = 1\,201\text{ K}$.

$$P_m(\tau_5) = 0,285 \times 1201 \times 297 = 100\,750 \text{ Па}.$$

– значение координаты НЗ определяем по формуле:

$$Y(\tau_5) = 2 - \frac{100\,750 - 101\,325}{9,8 \times [1,205 - 0,285] \times 1\,000} = 2,06 \text{ м}.$$

В зависимости от расположения проёма относительно НЗ ($y_H < Y(\tau_5) < y_6$ – смешанный режим):

– приток воздуха:

$$\begin{aligned} G &= \frac{2}{3} \times \beta \times F_1 \times \sqrt{2 \times g \times [Y(\tau_5) - y_H] \times \rho \times [\rho - \rho_m(\tau_5)]} = \\ &= 0,66 \times 0,65 \times 2,13 \times \sqrt{2 \times 9,8 \times [1,9 - 1] \times 1,205 \times [1,205 - 0,285]} \\ &= 3,8 \frac{\text{кг}}{\text{с}}; \end{aligned}$$

– отток продуктов горения определяется по формуле:

$$\begin{aligned} G_m &= \frac{2}{3} \times \beta \times (F_{\text{пр}} - F_1) \times \sqrt{2 \times g \times [y_6 - Y(\tau_5)] \times \rho_m(\tau_5) \times [\rho - \rho_m(\tau_5)]} = \\ &= 0,66 \times 0,65 \times (6,4 - 2,13) \sqrt{2 \times 9,8 \times [2,6 - 1,9] \times 0,285 \times [1,205 - 0,285]} \\ &= 4,0 \frac{\text{кг}}{\text{с}}. \end{aligned}$$

– $\tau_6 = 54 \text{ мин}$:

– плотность газовой среды при температуре газовой среды помещении

$$t(\tau_6) = 886 \text{ }^{\circ}\text{C}:$$

$$\rho_m(\tau_6) = 0,33 + \frac{(0,301 - 0,33)}{(900 - 800)} \times (886 - 800) = 0,305 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3};$$

– среднеобъёмное давление газовой среды:

$$P_m(\tau_6) = \rho_m(\tau_6) \times T_f(\tau_6) \times R.$$

$$\text{Здесь } T_f(\tau_6) = 886 + 273 = 1159 \text{ K}.$$

$$P_m(\tau_6) = 0,305 \times 1159 \times 297 = 104\,983 \text{ Па}.$$

– значение координаты НЗ определяем по формуле:

$$Y(\tau_6) = 2 - \frac{104\,983 - 101\,325}{9,8 \times [1,205 - 0,305] \times 1\,000} = 1,6 \text{ м}.$$

В зависимости от расположения проёма относительно НЗ ($y_H < Y(\tau_6) < y_{\text{в}}$ – смешанный режим):

– приток воздуха:

$$\begin{aligned} G &= \frac{2}{3} \times \beta \times F_1 \times \sqrt{2 \times g \times [Y(\tau_6) - y_H] \times \rho \times [\rho - \rho_m(\tau_6)]} = \\ &= 0,66 \times 0,65 \times 2,13 \times \sqrt{2 \times 9,8 \times [1,6 - 1] \times 1,205 \times [1,205 - 0,305]} = 3,3 \frac{\text{кг}}{\text{с}}; \end{aligned}$$

– отток продуктов горения определяется по формуле:

$$\begin{aligned} G_m &= \frac{2}{3} \times \beta \times (F_{\text{пр}} - F_1) \times \sqrt{2 \times g \times [y_{\text{в}} - Y(\tau_6)] \times \rho_m(\tau_6) \times [\rho - \rho_m(\tau_6)]} = \\ &= 0,66 \times 0,65 \times (6,4 - 2,13) \times \sqrt{2 \times 9,8 \times [2,6 - 1,6] \times 0,305 \times [1,205 - 0,305]} = 4,3 \frac{\text{кг}}{\text{с}}. \end{aligned}$$

– $\tau_7 = 63 \text{ мин}$:

– плотность газовой среды при температуре газовой среды помещении

$$t(\tau_7) = 743 \text{ }^{\circ}\text{C}:$$

$$\rho_m(\tau_7) = 0,363 + \frac{(0,33 - 0,363)}{(800 - 700)} \times (743 - 700) = 0,348 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3};$$

– среднеобъёмное давление газовой среды:

$$P_m(\tau_7) = \rho_m(\tau_7) \times T_f(\tau_7) \times R.$$

Здесь $T_f(\tau_7) = 743 + 273 = 1\,016\text{ K}$.

$$P_m(\tau_7) = 0,305 \times 1\,016 \times 297 = 105\,229\text{ Па.}$$

– значение координаты НЗ определяем по формуле:

$$Y(\tau_7) = 2 - \frac{105\,229 - 101\,325}{9,8 \times [1,205 - 0,348] \times 1\,000} = 1,5\text{ м.}$$

В зависимости от расположения проёма относительно НЗ

($y_H < Y(\tau_7) < y_B$ – *смешанный режим*):

– приток воздуха:

$$\begin{aligned} G &= \frac{2}{3} \times \beta \times F_1 \times \sqrt{2 \times g \times [Y(\tau_7) - y_H] \times \rho \times [\rho - \rho_m(\tau_7)]} = \\ &= 0,66 \times 0,65 \times 2,13 \times \sqrt{2 \times 9,8 \times [1,5 - 1] \times 1,205 \times [1,205 - 0,348]} = 2,9 \frac{\text{кг}}{\text{с}}; \end{aligned}$$

– отток продуктов горения определяется по формуле:

$$\begin{aligned} G_m &= \frac{2}{3} \times \beta \times (F_{\text{пр}} - F_1) \times \sqrt{2 \times g \times [y_B - Y(\tau_7)] \times \rho_m(\tau_7) \times [\rho - \rho_m(\tau_7)]} = \\ &= 0,66 \times 0,65 \times (6,4 - 2,13) \times \sqrt{2 \times 9,8 \times [2,6 - 1,5] \times 0,348 \times [1,205 - 0,348]} = 4,7 \frac{\text{кг}}{\text{с}}. \end{aligned}$$

– $\tau_8 = 72\text{ мин}$:

– *плотность газовой среды при температуре газовой среды помещения*

$t_f(\tau_8) = 567\text{ °C}$:

$$\rho_m(\tau_8) = 0,457 + \frac{(0,405 - 0,457)}{(600 - 500)} \times (567 - 500) = 0,422 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3};$$

– среднеобъёмное давление газовой среды:

$$P_m(\tau_8) = \rho_m(\tau_8) \times T_f(\tau_8) \times R.$$

Здесь $T_f(\tau_8) = 567 + 273 = 840\text{ K}$.

$$P_m(\tau_8) = 0,422 \times 840 \times 297 = 105\,295\text{ Па.}$$

– значение координаты НЗ определяем по формуле:

$$Y(\tau_8) = 2 - \frac{105\,295 - 101\,325}{9,8 \times [1,205 - 0,422] \times 1\,000} = 1,4 \text{ м.}$$

В зависимости от расположения проёма относительно НЗ ($y_H < Y(\tau_8) < y_в$ – смешанный режим):

– приток воздуха:

$$G = \frac{2}{3} \times \beta \times F_1 \times \sqrt{2 \times g \times [Y(\tau_8) - y_H] \times \rho \times [\rho - \rho_m(\tau_8)]} =$$

$$= 0,66 \times 0,65 \times 2,13 \times \sqrt{2 \times 9,8 \times [1,4 - 1] \times 1,205 \times [1,205 - 0,422]} = 2,5 \frac{\text{кг}}{\text{с}};$$

– отток продуктов горения определяется по формуле:

$$G_m = \frac{2}{3} \times \beta \times (F_{пр} - F_1) \times \sqrt{2 \times g \times [y_в - Y(\tau_8)] \times \rho_m(\tau_8) \times [\rho - \rho_m(\tau_8)]} =$$

$$= 0,66 \times 0,65 \times (6,4 - 2,13) \times \sqrt{2 \times 9,8 \times [2,6 - 1,4] \times 0,422 \times [1,205 - 0,422]} = 5,0 \frac{\text{кг}}{\text{с}}.$$

Результаты проведённых расчётов представлены в табл. 4.3 и в виде графика $G_m = f(\tau)$, $G = f(\tau)$ (см. рис. 4.2).

Таблица 4.3 – Результаты расчётов

Время, τ [мин.]	0	9	18	27	36	45	54	63	72
Температура продуктов горения, $^{\circ}\text{C}$	20	39	201	518	804	928	886	743	567
Приток поступающего воздуха, G [кг/с]	0	0	1,45	2,8	3,0	3,8	3,3	2,9	2,5
Расход оттока газовой среды, G_m [кг/с]	0	3,5	5,6	5,5	4,5	4,0	4,3	4,7	5,0

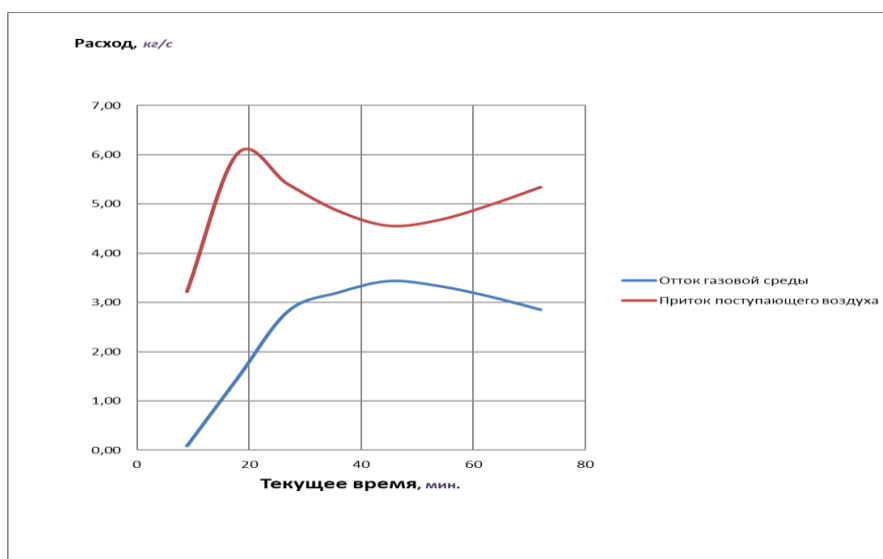


Рисунок 4.2 – Газообмен при пожаре в помещении почты

4.3. Расчёт фактического предела огнестойкости элемента металлической конструкции

Для расчёта фактического предела огнестойкости $\tau_{\text{ф}}$ незащищённого стального швеллера № 12 (размеры профиля из *Приложения Г*, свойства ст. 45 из *Приложения Ж*, $t_{\text{кр}} = 480 \text{ }^{\circ}\text{C}$) используем результаты расчёта из примера расчёта среднеобъёмной температуры продуктов горения при свободно развивающемся пожаре в помещении, представленного в п.п. 4.1, а так же примем численные значения степеней черноты пламени и обогреваемой поверхности конструкции равными, соответственно, $\varepsilon_2 = 0,85$ и $\varepsilon_1 = 0,7$.

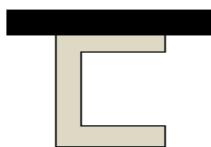


Рисунок 4.3 – Схема опирания исследуемого элемента металлической конструкции

Первоначально, рассчитываются значения площади поперечного сечения S и обогреваемого периметра сечения U исследуемого элемента по формулам, представленным в табл. 3.2 для определения приведённой толщины металлической конструкции:

$$S = t \times (h + 2 \times b - 2 \times t) = 0,0048 \times (0,12 + 2 \times 0,052 - 2 \times 0,0048) = 0,00103 \text{ м}^2 .$$

$$U = h + 3 \times b - 2 \times t = 0,12 + 3 \times 0,052 - 2 \times 0,0048 = 0,2664 \text{ м.}$$

$$\delta_{\text{пр}} = \frac{S}{U} = \frac{0,00103}{0,2664} = 0,0038 \text{ м.}$$

Вычисляется значение приведённой степени черноты $\varepsilon_{\text{пр}}$:

$$\varepsilon_{\text{пр}} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1} = \frac{1}{\frac{1}{0,7} + \frac{1}{0,85} - 1} = 0,62$$

Для решения данной задачи необходимо знать динамику прогрева элемента металлической конструкции, с этой целью температура металлической конструкции определяется последовательно в каждый момент времени с интервалом $\Delta\tau$ до момента времени достижения максимального значения среднеобъёмной температуры греющей среды (в данном варианте $t_{max} = 918\text{ }^{\circ}\text{C}$).

1. $\tau_1 = 540\text{ с}$ (9 мин.).

Значение среднеобъёмной температуры греющей среды в **данный момент времени** определяется:

- либо из ранее полученных результатов на 1-ом этапе;
- либо рассчитывается по формуле:

$$t_f(\tau_i) = t_0 + (t_{max} - t_0) \times 115,6 \times \left(\frac{\tau_i}{\tau_{max}} \right)^{4,75} \times e^{-4,75 \times \left(\frac{\tau_i}{\tau_{max}} \right)}.$$

В момент времени $\tau_1 = 9\text{ мин.}$ температура греющей среды исходя из графика равна $t_f(\tau_1) \approx 39\text{ }^{\circ}\text{C}$, а значения среднеобъёмной температуры греющей среды и металлической конструкции в предыдущий момент времени (т.е., когда $\tau = 0$) принимаются равными температуре до начала огневого воздействия:

$$t_f(\tau_{i-1}) = t(\tau_{i-1}) = t(\tau_0) = 20\text{ }^{\circ}\text{C}.$$

Первое приближение:

Исходя из физических соображений, задаём значение **нулевого приближения искомой температуры** в момент времени τ_1 (т.е. $20\text{ }^{\circ}\text{C} < t^1(\tau_1) < 39\text{ }^{\circ}\text{C}$):

Исходя из этого, предполагаем $t^1(\tau_1) = 24\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Т.е. считаем, что:

$$t(\tau_i) = t^1(\tau_1)$$

Рассчитываются средние температуры металлической конструкции и греющей среды для 1-го интервала времени:

$$\bar{t}(\tau_1) = \frac{t(\tau_1) + t(\tau_0)}{2} = \frac{24 + 20}{2} = 22 \text{ } ^\circ\text{C},$$

$$\bar{t}_f(\tau_1) = \frac{t_f(\tau_1) + t_f(\tau_0)}{2} = \frac{39 + 20}{2} = 29,5 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

или

$$\bar{T}(\tau_1) = 295 \text{ K}, \quad \bar{T}_f(\tau_1) = 302,5 \text{ K}.$$

При температуре $\bar{t}(\tau_i)$ рассчитывается с помощью линейной интерполяции удельная теплоёмкость материала $c(\bar{t})$, используя табличные значения в *Приложение Ж* для соответствующей марки стали.

$$c(\bar{t}) = 465 + \frac{469 - 465}{27 - 0} \times (22 - 0) = 468,2 \text{ Дж(кг} \times \text{K)}.$$

Вычисляется среднее значение коэффициента теплообмена между продуктами горения и металлической конструкции $\alpha(\tau_1)$ (см.3.1).

Определяется в первом приближении α_1 :

$$\alpha(\tau_1) = 29 + \frac{C_0 \times \varepsilon_{\text{пр}} \times \left[\left(\frac{\bar{T}_f(\tau_1)}{100} \right)^4 - \left(\frac{\bar{T}(\tau_1)}{100} \right)^4 \right]}{\bar{T}_f(\tau_1) - \bar{T}(\tau_1)} = 29 + \frac{5,67 \times 0,62 \times \left[\left(\frac{302,5}{100} \right)^4 - \left(\frac{295}{100} \right)^4 \right]}{302,5 - 295} = 32,7 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \times \text{K}};$$

Пересчитываем значение искомой температуры $t(\tau_i)$:

$$t(\tau_1) = \frac{\alpha(\tau_1) \times \bar{t}_f(\tau_1) + \frac{c(\bar{t}) \times \gamma \times \delta_{\text{пр}}}{\Delta \tau} \times t(\tau_0)}{\alpha(\tau_1) + \frac{c(\bar{t}) \times \gamma \times \delta_{\text{пр}}}{\Delta \tau}} = \frac{32,7 \times 29,5 + \frac{468,2 \times 7\,770 \times 0,0038}{540} \times 20}{32,7 + \frac{468,2 \times 7\,770 \times 0,0038}{540}} = 27,1 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Оцениваем отличие вновь полученного значения искомой температуры от нулевого приближения:

$$\frac{|t(\tau_1) - t^1(\tau_1)|}{t(\tau_1)} \times 100 \% = \frac{|27,1 - 24|}{27,1} \times 100 \% = 11,4 \%.$$

Так как, условие сходимости **не выполняется** (*принято*, что **расхождение не должно превышать 3 %**), то вновь полученное значение $t(\tau_1)$ присваивается $t^1(\tau_1)$, и расчеты повторяются.

Второе приближение:

Таким образом:

$$t^1(\tau_2) = 27,1 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Т.е. считаем, что:

$$t(\tau_2) = t^1(\tau_2)$$

$$\bar{t}(\tau_1) = \frac{t(\tau_1) + t(\tau_1)}{2} = \frac{27,1 + 20}{2} = 23,55 \text{ } ^\circ\text{C}$$

или

$$\bar{T}(\tau_2) = 296,55 \text{ K}, \quad \bar{T}_f(\tau_1) = 302,5 \text{ K}.$$

$$c(\bar{t}) = 465 + \frac{469 - 465}{27 - 0} \times (23,55 - 0) = 468,5 \text{ Дж (кг} \times \text{K)}.$$

$$\alpha(\tau_1) = 29 + \frac{C_0 \times \varepsilon_{\text{np}} \times \left[\left(\frac{\bar{T}_f(\tau_2)}{100} \right)^4 - \left(\frac{\bar{T}(\tau_2)}{100} \right)^4 \right]}{\bar{T}_f(\tau_2) - \bar{T}(\tau_2)} = 29 + \frac{5,67 \times 0,62 \times \left[\left(\frac{302,5}{100} \right)^4 - \left(\frac{296,55}{100} \right)^4 \right]}{302,5 - 296,55} = 32,8 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \times \text{K}};$$

Пересчитываем значение искомой температуры $t(\tau_2)$:

$$t(\tau_1) = \frac{\alpha(\tau_1) \times \bar{t}_f(\tau_1) + \frac{c(\bar{t}) \times \gamma \times \delta_{\text{np}}}{\Delta \tau} \times t(\tau_1)}{\alpha(\tau_1) + \frac{c(\bar{t}) \times \gamma \times \delta_{\text{np}}}{\Delta \tau}} = \frac{32,8 \cdot 29,5 + \frac{468,5 \times 7\,770 \times 0,0038}{540} \times 20}{32,8 + \frac{468,5 \times 7\,770 \times 0,0038}{540}} \approx 27,1 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Оцениваем отличие вновь полученного значения искомой температуры от предыдущего приближения:

$$\frac{|t(\tau_1) - t^1(\tau_1)|}{t(\tau_1)} \times 100 \% = \frac{|27,1 - 27,1|}{27,1} \times 100 \% \approx 0 \%.$$

Так как условие сходимости выполнено, то осуществляется переход к расчёту температуры в следующий момент времени $t(\tau_2)$.

$$2. \quad \tau_2 = \tau_1 + \Delta\tau = 1\,080 \text{ с (18 мин.)}.$$

Значение среднеобъёмной температуры греющей среды в данный момент времени:

$$t_f(\tau_2) \approx 201 \text{ }^{\circ}\text{C}.$$

Значение температуры металлической конструкции в предыдущий момент времени равно:

$$t(\tau_1) = 27,1 \text{ }^{\circ}\text{C}.$$

Первое приближение:

Исходя из физических соображений, задаём значение **нулевого приближения** **искомой температуры** в момент времени τ_2 (т.е. $27,1 \text{ }^{\circ}\text{C} < t^1(\tau_2) < 201 \text{ }^{\circ}\text{C}$):

Исходя из этого, предполагаем $t^1(\tau_2) = 40 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

Т.е. считаем, что:

$$t(\tau_2) = t^1(\tau_2)$$

Рассчитываются средние температуры металлической конструкции и греющей среды для 1-го интервала времени:

$$\bar{t}(\tau_2) = \frac{t(\tau_2) + t(\tau_1)}{2} = \frac{40 + 27,1}{2} = 33,55 \text{ }^{\circ}\text{C},$$

$$\bar{t}_f(\tau_2) = \frac{t_f(\tau_2) + t_f(\tau_1)}{2} = \frac{201 + 39}{2} = 120,0 \text{ }^{\circ}\text{C}.$$

или

$$\bar{T}(\tau_2) = 306,55 \text{ K}, \quad \bar{T}_f(\tau_2) = 393,0 \text{ K}.$$

$$c(\bar{t}) = 469 + \frac{506 - 469}{127 - 27} \times (33,5 - 27) = 471,4 \text{ Дж(кг} \times \text{K)}.$$

$$\alpha(\tau_2) = 29 + \frac{C_0 \times \varepsilon_{\text{пр}} \times \left[\left(\frac{\bar{T}_f(\tau_2)}{100} \right)^4 - \left(\frac{\bar{T}(\tau_2)}{100} \right)^4 \right]}{\bar{T}_f(\tau_2) - \bar{T}(\tau_2)} = 29 + \frac{5,67 \times 0,62 \times \left[\left(\frac{393,0}{100} \right)^4 - \left(\frac{306,55}{100} \right)^4 \right]}{393,0 - 306,55} = 35,1 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \times \text{K}};$$

Пересчитываем значение искомой температуры $t(\tau_2)$:

$$t(\tau_2) = \frac{\alpha(\tau_2) \times \bar{t}_f(\tau_2) + \frac{c(\bar{t}) \times \gamma \times \delta_{\text{нр}}}{\Delta \tau} \times t(\tau_1)}{\alpha(\tau_2) + \frac{c(\bar{t}) \times \gamma \times \delta_{\text{нр}}}{\Delta \tau}} = \frac{35,1 \times 120 + \frac{468,6 \times 7770 \times 0,0038}{540} \times 27,1}{35,1 + \frac{468,6 \times 7770 \times 0,0038}{540}} \approx 79,4 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Оцениваем отличие вновь полученного значения искомой температуры от нулевого приближения:

$$\frac{|t(\tau_2) - t^1(\tau_2)|}{t(\tau_2)} \times 100 \% = \frac{|79,4 - 40|}{79,4} \times 100 \% = 53,6 \%$$

Так как, условие сходимости **не выполняется**, то вновь полученное значение $t(\tau_2)$ присваивается $t^1(\tau_2)$, и расчёты повторяются.

Второе приближение:

Таким образом :

$$t^1(\tau_2) = 79,4 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Т.е. считаем, что:

$$t(\tau_2) = t^1(\tau_2)$$

$$\bar{t}(\tau_2) = \frac{t(\tau_2) + t(\tau_1)}{2} = \frac{79,4 + 27,1}{2} = 53,25 \text{ } ^\circ\text{C},$$

$$\bar{t}_f(\tau_2) = 120,0 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

или

$$\bar{T}(\tau_2) = 326,25 \text{ K}, \quad \bar{T}_f(\tau_2) = 393,0 \text{ K}.$$

$$c(\bar{t}) = 469 + \frac{506 - 469}{127 - 27} \times (53,25 - 27) = 478,7 \text{ Дж(кг} \times \text{K)}.$$

$$\alpha(\tau_2) = 29 + \frac{C_0 \times \varepsilon_{\text{нр}} \times \left[\left(\frac{\bar{T}_f(\tau_2)}{100} \right)^4 - \left(\frac{\bar{T}(\tau_2)}{100} \right)^4 \right]}{\bar{T}_f(\tau_2) - \bar{T}(\tau_2)} = 29 + \frac{5,67 \times 0,62 \times \left[\left(\frac{393,0}{100} \right)^4 - \left(\frac{326,25}{100} \right)^4 \right]}{393,0 - 326,25} = 35,6 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \times \text{K}}.$$

Пересчитываем значение искомой температуры $t(\tau_2)$:

$$t(\tau_2) = \frac{\alpha(\tau_2) \times \bar{t}_f(\tau_2) + \frac{c(\bar{t}) \times \gamma \times \delta_{\text{нр}}}{\Delta \tau} \times t(\tau_1)}{\alpha(\tau_2) + \frac{c(\bar{t}) \times \gamma \times \delta_{\text{нр}}}{\Delta \tau}} = \frac{35,6 \cdot 120 + \frac{478,7 \times 7770 \times 0,0038}{540} \times 27,1}{35,6 + \frac{478,7 \times 7770 \times 0,0038}{540}} \approx 80,7 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Оцениваем отличие вновь полученного значения искомой температуры от предыдущего приближения:

$$\frac{|t(\tau_2) - t^1(\tau_2)|}{t(\tau_2)} \times 100 \% = \frac{|80,7 - 79,4|}{80,7} \times 100 \% \approx 1,6 \%$$

Так как условие сходимости выполнено, то осуществляется переход к расчёту температуры в следующий момент времени $t(\tau_3)$.

$$3. \quad \tau_3 = \tau_2 + \Delta\tau = 1\ 620\ c\ (27\ мин.).$$

Значение среднеобъёмной температуры греющей среды в данный момент времени:

$$t_f(\tau_3) \approx 518\ ^\circ C.$$

Значение температуры металлической конструкции в предыдущий момент времени равно:

$$t(\tau_2) = 80,7\ ^\circ C.$$

Первое приближение:

Исходя из физических соображений, задаём значение **нулевого приближения** **искомой температуры** в момент времени τ_2 (т.е. $80,7\ ^\circ C < t^1(\tau_3) < 518\ ^\circ C$):

Исходя из этого, предполагаем $t^1(\tau_3) = 300,0\ ^\circ C$.

Т.е. считаем, что:

$$t(\tau_3) = t^1(\tau_3)$$

$$\bar{t}(\tau_3) = \frac{t(\tau_3) + t(\tau_2)}{2} = \frac{300,0 + 80,7}{2} = 190,35\ ^\circ C,$$

$$\bar{t}_f(\tau_3) = \frac{t_f(\tau_3) + t_f(\tau_2)}{2} = \frac{518 + 201}{2} = 359,5\ ^\circ C.$$

или

$$\bar{T}(\tau_3) = 465,35\ K, \quad \bar{T}_f(\tau_3) = 632,5\ K.$$

$$c(\bar{t}) = 521 + \frac{660 - 521}{527 - 327} \times (465,35 - 327) = 617,2\ Дж(кг \times K).$$

$$\alpha(\tau_3) = 29 + \frac{C_0 \times \varepsilon_{np} \times \left[\left(\frac{\bar{T}_f(\tau_3)}{100} \right)^4 - \left(\frac{\bar{T}(\tau_3)}{100} \right)^4 \right]}{\bar{T}_f(\tau_3) - \bar{T}(\tau_3)} = 29 + \frac{5,67 \times 0,62 \times \left[\left(\frac{632,5}{100} \right)^4 - \left(\frac{465,35}{100} \right)^4 \right]}{632,5 - 465,35} = 68,5 \frac{Вт}{м^2 \times K};$$

Пересчитываем значение искомой температуры $t(\tau_3)$:

$$t(\tau_3) = \frac{\alpha(\tau_3) \times \bar{t}_f(\tau_3) + \frac{c(\bar{t}) \times \gamma \times \delta_{\text{нр}} \times t(\tau_2)}{\Delta\tau}}{\alpha(\tau_3) + \frac{c(\bar{t}) \times \gamma \times \delta_{\text{нр}}}{\Delta\tau}} = \frac{68,5 \times 359,5 + \frac{617,2 \times 7\,770 \times 0,0038}{540} \times 80,7}{68,5 + \frac{617,2 \times 7\,770 \times 0,0038}{540}} = 373,7 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Оцениваем отличие вновь полученного значения искомой температуры от нулевого приближения:

$$\frac{|t(\tau_3) - t^1(\tau_3)|}{t(\tau_3)} \times 100 \% = \frac{|373,7 - 300,0|}{373,7} \times 100 \% \approx 24,5 \%$$

Так как, условие сходимости **не выполняется**, то вновь полученное значение $t(\tau_3)$ присваивается $t^1(\tau_3)$, и расчёты повторяются.

Второе приближение:

Считаем, что :

$$t^1(\tau_3) = 373,7 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Тогда

$$t(\tau_3) = t^1(\tau_3)$$

$$\bar{t}(\tau_3) = \frac{t(\tau_3) + t(\tau_2)}{2} = \frac{373,7 + 80,7}{2} = 227,2 \text{ } ^\circ\text{C},$$

$$\bar{t}_f(\tau_3) = 359,5 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

или

$$\bar{T}(\tau_3) = 500,2 \text{ K}, \quad \bar{T}_f(\tau_3) = 632,5 \text{ K}.$$

$$c(\bar{t}) = 521 + \frac{660 - 521}{527 - 327} \times (500,2 - 327) = 641,4 \text{ Дж(кг} \cdot \text{K)}.$$

$$\alpha(\tau_2) = 29 + \frac{C_0 \times \varepsilon_{\text{нр}} \times \left[\left(\frac{\bar{T}_f(\tau_3)}{100} \right)^4 - \left(\frac{\bar{T}(\tau_3)}{100} \right)^4 \right]}{\bar{T}_f(\tau_3) - \bar{T}(\tau_3)} = 29 + \frac{5,67 \times 0,62 \times \left[\left(\frac{632,5}{100} \right)^4 - \left(\frac{500,2}{100} \right)^4 \right]}{632,5 - 500,2} = 68,8 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \times \text{K}}.$$

Пересчитываем значение искомой температуры $t(\tau_3)$:

$$t(\tau_3) = \frac{\alpha(\tau_3) \times \bar{t}_f(\tau_3) + \frac{c(\bar{t}) \times \gamma \times \delta_{\text{нр}} \times t(\tau_2)}{\Delta\tau}}{\alpha(\tau_3) + \frac{c(\bar{t}) \times \gamma \times \delta_{\text{нр}}}{\Delta\tau}} = \frac{68,8 \times 359,5 + \frac{641,4 \times 7\,770 \times 0,0038}{540} \times 25,6}{68,8 + \frac{641,4 \times 7\,770 \times 0,0038}{540}} = 370,3 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Оцениваем отличие вновь полученного значения искомой температуры от предыдущего приближения:

$$\frac{|t(\tau_3) - t^1(\tau_3)|}{t(\tau_3)} \times 100 \% = \frac{|370,3 - 373,7|}{370,3} \times 100 \% \approx 0,1\% .$$

Так как условие сходимости выполнено, то осуществляется переход к расчёту температуры в следующий момент времени $t(\tau_4)$.

Таким образом, следуя указанному алгоритму расчёта температуры элемента металлической конструкции, были получены значения искомых температур для других моментов времени.

По результатам расчетов строится график изменения температуры элемента металлической конструкции $t(\tau)$ от времени.

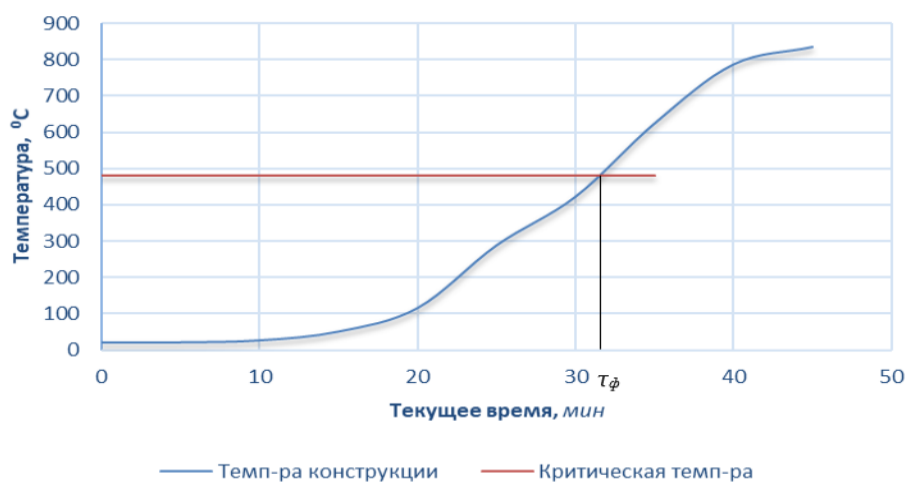


Рисунок 4.3 – Динамика прогрева исследуемого элемента металлической конструкции

Используя график изменения температуры нагрева исследуемого швеллера определяется значение времени прогрева до критической температуры $t_{кр} = 480\text{ }^{\circ}\text{C}$, то есть утраты его несущей способности конструкции. Найденные значения сведены в табл. 4.4.

Таблица 4.4 – Результаты расчетов

Текущее время, τ [мин.]	0	9	18	27	36	45
Температура продуктов горения, $^{\circ}\text{C}$	20	39	201	518	...	...
Коэффициент теплообмена α , $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$	-	32,8	35,6	68,8	...	...
Температура прогрева элемента конструкции, $^{\circ}\text{C}$	20	27,1	80,7	370,3	...	...
Критическая температура $t_{кр}$, $^{\circ}\text{C}$	480					
Фактический предел огнестойкости, $\tau_{ф}$ мин	...					

4.4. Расчёт необходимого времени эвакуации людей

Определить необходимое время эвакуации людей из помещения объекта, рассматриваемого ранее в предыдущих задачах, а именно – почты.

Необходимое время эвакуации людей из помещения почты определяется в зависимости от времени достижения опасными факторами пожара своих критических значений для наиболее опасного варианта развития пожара, характеризующегося наибольшим темпом нарастания ОФП в рассматриваемом помещении по методике изложенной в п.п. 3.3.

В качестве исходных данных берётся площадь помещения $S = 160,0 \text{ м}^2$, высота помещения $H = 4 \text{ м}$, t_0 – начальная температура в помещении – $20 \text{ }^\circ\text{C}$.

Горючий материал объекта исследования согласно *Приложению В* имеет следующие характеристики: $D_m = 155 \text{ Нп} \times \text{м}^2 \times \text{кг}^{-1}$; $L_{O_2} = 1,52 \text{ кг} \times \text{кг}^{-1}$; $L_{CO_2} = 0,97 \text{ кг} \times \text{кг}^{-1}$; $L_{CO} = 0,0094 \text{ кг} \times \text{кг}^{-1}$; $\psi = 0,018 \text{ кг} \times \text{м}^2 \times \text{с}^{-1}$; $v = 0,01 \text{ м} \times \text{с}^{-1}$.

Предполагается круговое развитие пожара.

Общий объём рассматриваемого помещения составляет $V_{\text{общ}} = 640 \text{ м}^3$. Свободный объём помещения определяется исходя из начального условия, в соответствии с которым объём мебели, оборудования и т.п. составляет 20 % от общего объёма помещения:

$$V = 0,8 \times V_{\text{общ}} = 0,8 \times 640 = 512 \text{ м}^3.$$

Размерный комплекс В будет равен:

$$B = \frac{353 \times C_p \times V}{(1 - \varphi) \times Q \times \eta} = \frac{353 \times 1,068 \times 10^{-3} \times 512}{(1 - 0,25) \times 0,9 \times 13,8} = 20,7 \text{ кг},$$

Параметр Z будет равен:

$$Z = \frac{h_{pz}}{H} \times e^{1,4 \times \frac{h_{pz}}{H}} = \frac{1,7}{4} \times e^{1,4 \times \frac{1,7}{4}} = 0,77.$$

Здесь

$$h_{pz} = h_{пл} + 1,7 \times 0,5 \times \delta.$$

Так как, $h_{пл} = 0$ и $\delta = 0$, то значит:

$$h_{пл} = 1,7 \text{ м.}$$

При круговом развитии пожара:

$$A = 1,05 \cdot \psi \cdot v^2 = 1,05 \cdot 0,18 \cdot 0,01^2 = 1,89 \cdot 10^{-6} \frac{\text{кг}}{\text{с}^2}.$$

Для кругового распространения пламени по поверхности равномерно распределённого в горизонтальной плоскости горючего материала $n=3$.

Исходя из приведённых соотношений, время достижения опасными факторами пожара своих критических значений составит:

– *по критической температуре:*

$$\tau_{кр}^T = \left\{ \frac{B}{A} \times \ln \left[1 + \frac{70 - t_0}{(273 + t_0) \times Z} \right] \right\}^{\frac{1}{n}} = \left\{ \frac{20,7}{1,89 \times 10^{-6}} \times \ln \left[1 + \frac{70 - 20}{(273 + 20) \times 0,77} \right] \right\}^{\frac{1}{3}} = 123 \text{ с};$$

(t_0 – начальная температура в помещении, °C);

– *по потере видимости:*

$$\begin{aligned} \tau_{кр}^{ПВ} &= \left\{ \frac{B}{A} \times \ln \left[1 - \frac{V \times \ln(1,05 \times \alpha \times E)}{l_{пр} \times B \times D_m \times Z} \right]^{-1} \right\}^{\frac{1}{n}} = \\ &= \left\{ \frac{20,7}{1,89 \times 10^{-6}} \times \ln \left[1 - \frac{512 \times \ln(1,05 \times 0,3 \times 50)}{20 \times 20,7 \times 155 \times 0,77} \right]^{-1} \right\}^{\frac{1}{3}} = 212 \text{ с}; \end{aligned}$$

– *по пониженному содержанию кислорода:*

$$\tau_{кр}^{O_2} = \left\{ \frac{B}{A} \times \ln \left[1 - \frac{0,044}{\left(\frac{B \times L_{O_2}}{V} + 0,27 \right) \times Z} \right]^{-1} \right\}^{\frac{1}{n}} = \left\{ \frac{20,7}{1,89 \times 10^{-6}} \times \ln \left[1 - \frac{0,044}{\left(\frac{20,7 \times 1,52}{512} + 0,27 \right) \times 0,77} \right]^{-1} \right\}^{\frac{1}{3}} = 91 \text{ с};$$

– *по газообразному токсичному продукту (CO_2 , CO , HCL):*

$$\tau_{кр}^{ТГ} = \left\{ \frac{B}{A} \times \ln \left[1 - \frac{V \times X}{B \times L \times Z} \right]^{-1} \right\}^{\frac{1}{n}}.$$

Если под знаком логарифма получается отрицательное число, то данный ОФП не представляет опасности.

– по CO₂:

$$\tau_{кр}^{CO_2} = \left\{ \frac{20,7}{1,89 \times 10^{-6}} \times \ln \left[1 - \frac{512 \times 0,11}{20,4 \times 0,97 \times 0,77} \right]^{-1} \right\}^{\frac{1}{3}} < 0.$$

Данный ОФП не представляет опасности, так как значение *под знаком логарифма* получается отрицательным.

– по CO:

$$\tau_{кр}^{CO} = \left\{ \frac{20,7}{1,89 \times 10^{-6}} \times \ln \left[1 - \frac{512 \times 1,16 \times 10^{-3}}{20,4 \times 0,97 \times 0,77} \right]^{-1} \right\}^{\frac{1}{3}} = 249 \text{ с};$$

– по HCL:

$$\tau_{кр}^{HCl_2} = \left\{ \frac{20,7}{1,89 \cdot 10^{-6}} \times \ln \left[1 - \frac{512 \times 23 \times 10^{-6}}{20,4 \times 0,005 \times 0,77} \right]^{-1} \right\}^{\frac{1}{3}} = 222 \text{ с};$$

$$\tau_{кр} = \min (123; 212; 91; 249; 222) = 91 \text{ с}.$$

Вывод: необходимое время эвакуация из помещения почты равно:

$$\tau_{НВ} = 0,8 \times \frac{\tau_{кр}}{60} = 0,8 \times \frac{91}{60} = 1,2 \text{ мин.}$$

5. РАСЧЁТ ТЕРМОГАЗОДИНАМИЧЕСКОГО РЕЖИМА ПРИ ПОЖАРЕ В ПОМЕЩЕНИИ НА ОСНОВЕ ИНТЕГРАЛЬНОЙ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

5.1. ПЕРВЫЙ ЭТАП КУРСОВОГО ПРОЕКТА

«Расчёт среднеобъёмной температуры продуктов горения
при свободно развивающемся пожаре в помещении»

Задачей первого этапа является определение динамики изменения среднеобъёмной температуры внутреннего пожара в помещении исследуемого объекта, исходные данные которого, выбираются в соответствии с вариантом курсового проекта (представлены в разделе 1.1 – зона расположения пожарной нагрузки, размеры помещения и проёмов, характер и количество пожарной нагрузки).

Параметры пожарной нагрузки для моделирования динамики опасных факторов пожара принимаются по справочным данным приведённым в Приложении В.

Прежде чем перейти к непосредственному расчёту среднеобъёмной температуры, необходимо:

1. Определиться с режимом наиболее вероятного развития пожара.

Алгоритм определения возможного развития пожара:

- рассчитывается объем помещения V (м^3);
- рассчитывается площадь пола S (м^2);
- определяется площадь каждого проёма помещения A_i (м^2);
- определяется суммарная площадь проёмов:

$$A = \sum A_i ;$$

- определяется приведённая высота проёмов помещения $h_{\text{пр}}$ (м):

$$h_{\text{пр}} = \frac{\sum A_i \times h_i}{A} ;$$

где

h_i – высота i -того проёма помещения (м);

– рассчитывается проёмность Π помещения:

а) при $V < 10^3 \text{ м}^3$:

$$\Pi = \frac{\sum A_i \times h_i^{0,5}}{V^{0,66}}.$$

б) при $V > 10^3 \text{ м}^3$:

$$\Pi = \frac{\sum A_i \times h_i^{0,5}}{S}.$$

– количество воздуха, необходимое для сгорания 1 кг материала данной пожарной нагрузки, в первом приближении считаем равным $V_0 = 5,6 \text{ (кг/кг)}$;

– определяется удельное критическое количество пожарной нагрузки $q_{кр}$ (кг/м²) для исследуемого помещения (объекта исследования):

$$q_{кр} = \frac{4\,500 \times \Pi^3}{1 + 500 \times \Pi^3} + \frac{V^{0,33}}{6 \times V_0};$$

– вычисляется количество пожарной нагрузки q_s (кг/м²), отнесённое к площади пола помещения:

$$q_s = \frac{M_{пн}}{S};$$

– вычисляется удельное значение пожарной нагрузки q (кг/м²), отнесённое к площади тепловоспринимающей поверхностей помещения:

$$q = \frac{M_{пн} \times Q_{\text{н}}^{\text{p}}}{(6 \times V^{0,66} - A) \times Q_{\text{нг}}^{\text{p}}}.$$

где

$Q_{\text{н}}^{\text{p}}$ – низшая теплота сгорания материала пожарной нагрузки (МДж/кг);

$Q_{\text{нг}}^{\text{p}}$ – низшая теплота сгорания древесины ($\approx 13,8 \text{ МДж/кг}$);

$M_{пн}$ – общее количество горючей нагрузки (кг).

– сравниваются значения $q_{кр}$ и q

Если $q_{кр} > q$ – то в помещении будет пожар, *регулируемый нагрузкой (ПРН)*;

Если $q \geq q_{кр}$ – то в помещении будет пожар, *регулируемый вентиляцией (ПРВ)*.

2. Вычисляется время достижения максимального значения среднеобъёмной температуры τ_{max} , мин:

а) для ПРН:

$$\tau_{max} = 32 - 8,1 \times q^{3,2} \times e^{-0,92 \times q};$$

б) для ПРВ $\tau_{max} = \tau_n$,

где τ_n – характерная продолжительность объёмного пожара (ч), рассчитываемая по формуле:

$$\tau_{max} = \frac{M_{пн} \times Q_n^p}{6285 \times A \times \sqrt{h_{пр}}} \times \frac{\psi_g}{\psi}.$$

Здесь

ψ_g – средняя скорость выгорания древесины [$\approx 0,014$ кг/(м²·с)];

ψ – удельная скорость выгорания материала пожарной нагрузки выбирается из *Приложения В*.

3. Определяется значение максимальной среднеобъёмной температуры t_{max} :

а) для ПРН:

$$t_{max} - t_0 = 224 \times q^{0,528};$$

б) для ПРВ *с точностью до 5%*:

$$t_{max} = 940 \times e^{4,7 \times 10^{-3} \times (q_s - 30)}.$$

4. На основе полученных значений τ_{max} и t_{max} определяется изменение среднеобъёмной температуры во времени при объёмном свободно развивающемся пожаре:

$$t_f(\tau) = t_0 + (t_{max} - t_0) \times 115,6 \times \left(\frac{\tau_i}{\tau_{max}} \right)^{4,75} \times e^{-4,75 \times \left(\frac{\tau_i}{\tau_{max}} \right)},$$

где

t_0 – начальная среднеобъёмная температура, °C;

τ – текущее время, мин.

Расчёты проводятся для n моментов времени: $\tau_i = \Delta\tau \cdot i$, ($i=1, \dots, n$).

Расчётный интервал времени $\Delta\tau$ определяется из соотношения:

$$\Delta\tau = \frac{\tau_{max}}{5}.$$

Для удобства расчетов и построения графика предлагается численное значение $\Delta\tau$ округлять до ближайшего целого значения.

Результаты проведённых расчётов на данном этапе курсового проекта представляются в табличной форме (табл. 5.1–5.2) и в виде графика $t = f(\tau)$.

Таблица 5.1 – Результаты расчетов 1-го этапа

Общий объем помещения, V [м³]
Площадь помещения, S [м²]
Суммарная площадь проёмов, A [м²]
Приведённая высота проёмов помещения, $h_{пр}$ [м]
Проемность помещения, $П$ [м ^{0,5}]
Общая пожарная нагрузка, $M_{пн}$ [кг]
Кол-во пожарной нагрузки, отнесенное к площади пола помещения q_s [кг/м²]
Удельное критическое кол-во пожарной нагрузки, $q_{кр}$ [кг/м²]
Кол-во пожарной нагрузки, отнесенное к площади тепловоспринимающих поверхностей помещения q [кг/м²]
Время достижения максимального значения среднеобъемной темп-ры, τ_{max} [мин.]
Максимальное значение среднеобъемной темп-ры (<i>с точностью до 5%</i>), t_{max} [°C]
Режим пожара

Таблица 5.2 – Динамика изменения среднеобъёмной температуры

Время, τ [мин.]	0	$\Delta\tau$	$2 \cdot \Delta\tau$	...	$n \cdot \Delta\tau$
Среднеобъёмная температура, $t_f(\tau)$ [°C]					

Примечание: Пример расчёта среднеобъёмной температуры продуктов горения при свободно развивающемся пожаре в помещении приведён в 4.1.

5.2. ВТОРОЙ ЭТАП КУРСОВОГО ПРОЕКТА

«Расчёт расходов поступающего воздуха и газовой среды, удаляемой из помещения»

При выполнении второго этапа курсового проекта используются исходные данные соответствующего варианта (см. раздел 1.1), а также результаты расчётов, полученные на первом этапе.

Для непосредственного расчёта значений искомых величин в соответствующий момент времени τ_i необходимо изначально определяться с координатами нейтральной зоны (плоскости равных давлений) относительно проёма.

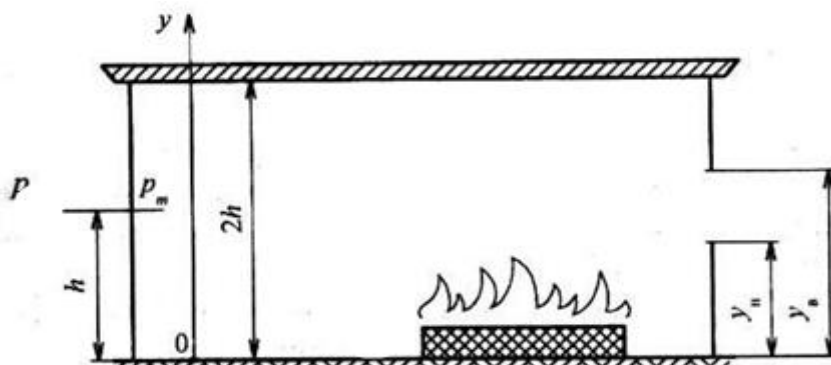


Рисунок 5.1 – Схема помещения

Положение нейтральной зоны в *соответствующий момент времени* можно рассчитать, используя следующую последовательность выполнения операций:

1. Определяется значение удельной газовой постоянной R , Дж/(кг×К):
 - а) если *не известен* количественный состав газовой среды (продуктов горения) – значение R принимается для азота:

$$R = \frac{8314}{\mu_{N_2}};$$

- б) если *известен* – значение R рассчитывается по формуле:

$$R = 8314 / \mu_{см},$$

$$R = \frac{8314}{\mu_{см}};$$

где

$$\mu_{\text{см}} = \sum_{i=1}^n \mu_i \times r_i,$$

где

$\mu_{\text{см}}$ – молекулярная масса смеси, кг/кмоль;

r_i – объёмная доля i -го продукта горения в газовой среде.

2. Определяются значения плотности атмосферного воздуха ρ и среднеобъёмной плотности газовой среды $\rho_m(\tau_i)$ в зависимости от температур, соответственно для t_0 и $t_f(\tau_i)$ из справочной литературы (*Приложения Б и А*), используя метод линейной интерполяции.

3. Рассчитывается среднеобъёмное давление газовой среды в помещении P_m по формуле:

$$P_m(\tau_i) = \rho_m(\tau_i) \times T_f(\tau_i) \times R.$$

Здесь $T_f(\tau_i) = t_f(\tau_i) + 273$.

4. Рассчитывается координата НЗ по формуле:

5.

$$Y(\tau_i) = h - \frac{P_m(\tau_i) - P}{g \times [\rho - \rho_m(\tau_i)] \times 1000}.$$

В условиях внутреннего пожара приток воздуха в зону горения и отток продуктов горения из помещения определяются по формулам в зависимости от расположения проёма относительно НЗ:

а) $Y(\tau_i) > y_v$ – режим всасывания:

– приток воздуха через весь проем определяется по формуле:

$$G = \frac{2}{3} \times \beta \times F_{\text{пр}} \times \sqrt{2 \times g \times h_{\text{пр}} \times \rho \times [\rho - \rho_m(\tau_i)]};$$

– отток продуктов горения $G_m=0$.

б) $y_n < Y(\tau_i) < y_v$ – смешанный режим:

– формула для расчёта притока воздуха имеет вид:

$$G = \frac{2}{3} \times \beta \times F_1 \times \sqrt{2 \times g \times [Y(\tau_i) - y_H] \times \rho \times [\rho - \rho_m(\tau_i)]};$$

– формула для расчёта уходящих газов через проём имеет вид:

$$G_m = \frac{2}{3} \times \beta \times (F_{\text{пр}} - F_1) \times \sqrt{2 \times g \times [y_B - Y(\tau_i)] \times \rho_m(\tau_i) \times [\rho - \rho_m(\tau_i)]}.$$

в) $y_H > Y(\tau_i)$ – режим выталкивания:

– приток воздуха $G = 0$;

– формула для расчёта расхода газа через весь проём:

$$G_m = \frac{2}{3} \times \beta \times F_{\text{пр}} \times \sqrt{2 \times g \times h_{\text{пр}} \times \rho_m(\tau_i) \times [\rho - \rho_m(\tau_i)]}.$$

В этих формулах:

h – 1/2 высоты помещения;

$h_{\text{пр}}$ – высота оконного проёма;

$F_{\text{пр}}$ – суммарная площадь оконных проёмов;

$F_1 = F_{\text{пр}}/3$; β – коэффициент сопротивления проёма, равный $\beta = 0,65$;

y_H – координата нижнего края проёма;

y_B – координата верхнего края проёма;

$\rho_m(\tau_i)$ – среднеобъёмное давление в момент времени τ_i ;

ρ – наружное давление в окружающей атмосфере;

$\rho_m(\tau_i)$ – среднеобъёмная плотность среды внутри помещения в момент времени τ_i ;

ρ – среднеобъёмная плотность воздуха;

$Y(\tau_i)$ – координата НЗ в момент времени τ_i .

Результаты проведённых расчетов на данном этапе курсовой работы представляются как в табличной форме (табл. 5.3), так и в виде графиков $G = f(\tau)$ и $G_m = f(\tau)$.

Таблица 5.3 Результаты расчетов 2-ого этапа

Текущее время, τ [мин.]	0	τ_1	τ_2	...	τ_n
Температура продуктов горения, t_f °C					
Отток газовой среды, G_m [кг/с]					
Приток поступающего воздуха, G [кг/с]					

Примечание: Пример расчёта газообмена на внутреннем пожаре приведён в 4.2.

5.3. ТРЕТИЙ ЭТАП КУРСОВОГО ПРОЕКТА

«Расчёт фактического предела огнестойкости элементов металлических конструкций»

На основе полученной на первом этапе курсового проекта динамики изменения среднеобъёмной температуры (табл. 5.2) и заданной критической температуры, исследуемого незащищённого элемента несущей металлической конструкции (табл. 5.4–5.6) **необходимо рассчитать для него фактический предел огнестойкости.**

Таблица 5.4 – Выбор профиля несущей металлической конструкции

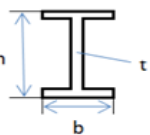
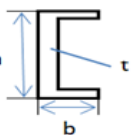
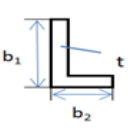
3-ья цифра варианта	Профиль	№ элемента по Приложению Г, Д или Е	Схема опирания
0		10	
1		16	
2		18	
3		24	
4		8	
5		14	
6		20	
7		22	
8		5	
9		11	

Таблица 5.5 – Свойства материала элемента несущей металлической конструкции

	2 –я цифра варианта									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Материал	Ст.20	Ст.35	Ст.45	Ст.У8	Ст.20	Ст.35	Ст.45	Ст.У8	Ст.20	Ст.35
$t_{кр}$	470	480	490	500	510	520	510	500	490	480

Таблица 5.6 – Исходные данные (степень черноты)

	1 –я цифра варианта									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
ε_1	0,9	0,85	0,86	0,82	0,85	0,88	0,86	0,84	0,82	0,85
ε_2	0,7	0,8	0,75	0,78	0,8	0,7	0,8	0,6	0,68	0,7

Для решения поставленной задачи необходимо получить динамику изменения температуры нагрева незащищённого элемента металлической конструкции и по полученной графической зависимости определить время прогрева τ до критической температуры, то есть утраты им несущей способности.

С этой целью температура металлической конструкции определяется последовательно через каждые Δt до момента времени, когда *среднеобъёмная температура греющей среды* достигает своего максимального значения.

Алгоритм решения

1. Переводятся численные значения исходных данных в систему СИ.
2. Рассчитываются значения площади поперечного сечения S и обогреваемого периметра сечения U соответствующей металлической конструкции по формулам, представленным в табл. 3.2.
3. Вычисляется значение приведённой толщины металлической конструкции $\delta_{пр}$ по формуле:

$$\delta_{пр} = \frac{S}{U}.$$

Для определения динамики изменения температуры металлической конструкции проводится расчёт температуры конструкции последовательно в каждый момент времени.

4. Температура металлической конструкции в каждый момент времени $t(\tau_i)$ с учётом меняющихся теплофизических свойств материала из-за высокотемпературного воздействия определяется методом последовательных приближений:

4.1 Исходя из физических соображений, задаётся значение **нулевого приближения искомой температуры** в момент времени τ_i .

Предполагаемое значение должно быть больше значения температуры в предыдущий момент времени $t(\tau_{i-1})$, но меньше температуры греющей среды в данный момент времени $t_f(\tau_i)$:

$$t^1(\tau_1) = \dots$$

4.2 Т.е., считаем, что :

$$t(\tau_i) = t^1(\tau_1)$$

4.3 Рассчитываются средние температуры металлической конструкции $\bar{t}$ и греющей среды $\bar{t}_f$ для i -того интервала времени:

$$\bar{t}(\tau_1) = \frac{t(\tau_1) + t(\tau_{i-1})}{2}, \quad \bar{t}_f(\tau_1) = \frac{t_f(\tau_1) + t_f(\tau_{i-1})}{2} . \quad .$$

Здесь $t(\tau_{i-1})$ и $t_f(\tau_{i-1})$ – температуры металлической конструкции и греющей среды в предыдущий момент времени τ_{i-1} [для первого интервала времени $i = 1$: $t_f(\tau_{i-1}) = t(\tau_{i-1}) = t(\tau_0)$].

Значения среднеобъёмных температур греющей среды $t_f(\tau_i)$ соответствуют значениям, полученным ранее для соответствующего момента времени:

При температуре $\bar{t}$ с помощью линейной интерполяции рассчитывается удельная теплоёмкость материала $c(\bar{t})$, используя табличные значения в Приложение Ж для соответствующей марки стали.

4.4 Вычисляется среднее значение коэффициента теплообмена между продуктами горения и металлической конструкции $\alpha(\tau_i)$ (см. в §3.1 формула 3.17).

4.5 Пересчитывается значение искомой температуры $t(\tau_i)$:

$$t(\tau_1) = \frac{\alpha(\tau_1) \times t_f(\tau_1) + \frac{c(\bar{t}) \times \gamma \times \delta_{\text{пр}}}{\Delta \tau} \times t(\tau_{i-1})}{\alpha(\tau_1) + \frac{c(\bar{t}) \times \gamma \times \delta_{\text{пр}}}{\Delta \tau}}.$$

4.6 Оценивается отличие вновь полученного значения искомой температуры от нулевого приближения:

$$\frac{|t(\tau_i) - t^1(\tau_i)|}{t(\tau_i)} \times 100 \% = \dots$$

4.7 Принято, что расхождение не должно превышать 3 %.

Если **не выполняется** это условие, то вновь полученное значение $t(\tau_i)$ присваивается $t^1(\tau_i)$, и расчёты повторяются с п. 4.2 до тех пор, пока не выполнится условие в п. 4.7.

При **выполнении** данного условия получаем искомое значение температуры $t(\tau_i)$, и осуществляется переход к расчёту температуры в следующий момент времени.

По результатам расчетов строится график изменения температуры исследуемого элемента металлической конструкции $t(\tau)$ от времени τ .

Полученный график позволяет определить значение времени прогрева до критической температуры $t_{\text{кр}}$.

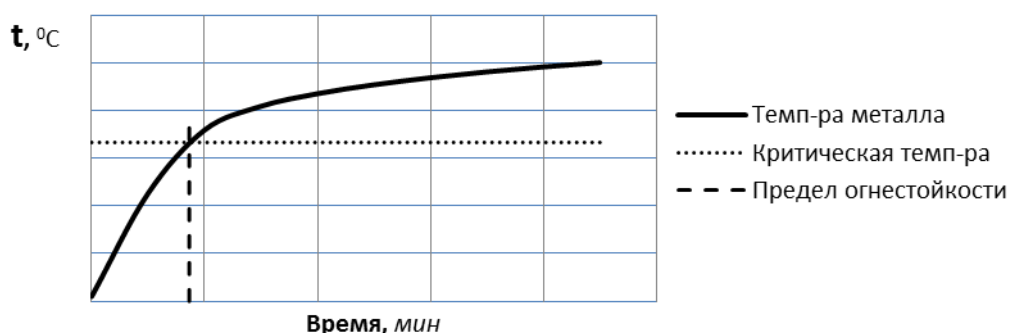


Рисунок 5.2 – Динамика прогрева исследуемого элемента металлической конструкции

Результаты расчетов представляются в табл. 5.7.

Таблица 5.7 – Результаты расчетов 3-его этапа

Текущее время, τ [мин.]	0	$\Delta\tau$	$2 \cdot \Delta\tau$	...	$n \cdot \Delta\tau$
Температура продуктов горения, $^{\circ}\text{C}$					
Температура прогрева элемента конструкции, $^{\circ}\text{C}$					
Критическая температура, $^{\circ}\text{C}$					
Фактический предел огнестойкости, $\tau_{\text{мин}}$					

Примечание: Пример расчёта фактического предела огнестойкости элемента металлической конструкции приведён в п.п. 4.3.

5.4. ЧЕТВЁРТЫЙ ЭТАП КУРСОВОГО ПРОЕКТА

«Расчёт необходимого времени эвакуации людей»

На четвёртом этапе курсового проекта необходимо определить необходимое время эвакуации людей из помещения исследуемого объекта.

Исходные данные помещения (t_0 – начальная температура воздуха в помещении; $V_{\text{общ}}$ – объём помещения; H – высота помещения) и характеристики горючих веществ (Q_H – низшая теплота сгорания материала; D_m – дымообразующая способность горящего материала, H_p м²/кг; L_{CO} , L_{CO_2} , L_{HCL} – удельные выходы CO, CO₂, HCL при сгорании 1 кг материала; L_{O_2} – удельный расход кислорода) берутся в соответствии с вариантом курсового проекта.

Предполагается круговое развитие пожара.

Расчёт необходимого времени эвакуации τ_{HB} производится для наиболее опасного варианта развития пожара, характеризующегося наибольшим темпом нарастания ОФП в рассматриваемом помещении.

Последовательность расчётов следующая:

1. Сначала рассчитывают значения **критической продолжительности пожара** по условию достижения каждым из ОФП предельно допустимых значений в зоне пребывания людей:

– **по критической температуре:**

$$\tau_{кр}^T = \left\{ \frac{B}{A} \times \ln \left[1 + \frac{70 - t_0}{(273 + t_0) \times Z} \right] \right\}^{\frac{1}{n}};$$

– **по потере видимости:**

$$\tau_{кр}^{ПВ} = \left\{ \frac{B}{A} \times \ln \left[1 - \frac{V \times \ln(1,05 \times \alpha \times E)}{l_{пр} \times B \times D_m \times Z} \right]^{-1} \right\}^{\frac{1}{n}};$$

– **по пониженному содержанию кислорода:**

$$\tau_{\text{кр}}^{O_2} = \left\{ \frac{B}{A} \times \ln \left[1 - \frac{0,044}{\left(\frac{B \times L_{O_2}}{V} + 0,27 \right) \times Z} \right]^{-1} \right\}^{\frac{1}{n}};$$

– по газообразному токсичному продукту (CO_2 , CO , HCL):

$$\tau_{\text{кр}}^{\text{ТГ}} = \left\{ \frac{B}{A} \times \ln \left[1 - \frac{V \times X}{B \times L \times Z} \right]^{-1} \right\}^{\frac{1}{n}};$$

(Если под знаком логарифма получается отрицательное число, то данный ОФП не представляет опасности).

В выше указанных формулах:

C_p – удельная изобарная теплоёмкость газа МДж/кг [$C_p = 0,001068$ МДж/(К×кг)]; φ – коэффициент теплопотерь [$\varphi = 0,25$]; η – коэффициент полноты горения [$\eta = 0,9$]; V – свободный объем помещения, м³ [$V = 0,8 \times V_{\text{общ}}$]; α – коэффициент отражения предметов на путях эвакуации; E – начальная освещённость, лк; $l_{\text{пр}}$ – предельная дальность видимости в дыму, м; X – предельно допустимое содержание токсичного газа в помещении, кг/м³ [$X_{CO_2} = 0,11$ кг/м³; $X_{CO} = 1,16 \times 10^{-3}$ кг/м³; $X_{HCL} = 23 \times 10^{-6}$ кг/м³].

При отсутствии специальных требований значения α , $l_{\text{пр}}$ и E принимаются равными соответственно 0.3, 20 м и 50 лк.

B – размерный комплекс, зависящий от теплоты сгорания материала и свободного объёма помещения, кг:

$$B = \frac{353 \times C_p \times V}{(1 - \varphi) \times Q \times \eta},$$

Z – безразмерный параметр, учитывающий неравномерность распределения ОФП по высоте помещения:

$$Z = \frac{h_{\text{рз}}}{H} \times e^{1,4 \times \frac{h_{\text{рз}}}{H}},$$

где

$$h_{pz} = h_{пл} + 1,7 \times 0,5 \times \delta.$$

если $h_{пл} = 0$ и $\delta = 0$, то $h_{пл} = 1,7$ м.

($h_{пл}$ – высота площадки, на которой находятся люди, над полом помещения;

δ – разность высот пола, равная нулю при горизонтальном его расположении).

A – размерный параметр, определяемый в зависимости от вида расчётной схемы развития пожара в помещении (см. п.п. 3.3).

Во всех рассматриваемых вариантах курсового проекта будем считать распространение пламени по поверхности *равномерно распределённого в горизонтальной плоскости горючего материала*.

2. Из полученных в результате расчетов значений критической продолжительности пожара выбирается минимальное:

$$\tau_{кр} = \min\{\tau_{кр}^T, \tau_{кр}^{ПВ}, \tau_{кр}^{O_2}, \tau_{кр}^{ТГ}\}.$$

Необходимое время эвакуация из помещения рассчитывается по формуле:

$$\tau_{нв} = 0,8 \times \frac{\tau_{кр}}{60} \text{ [мин]}.$$

Пример расчёта необходимого времени эвакуации приведён в 4.4.

Приложение А

Физические параметры продуктов горения

$t, ^\circ\text{C}$	$C_p, \text{кДж}/(\text{кг}\cdot^\circ\text{C})$	$\lambda \times 10^2, \text{Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$	$\rho, \text{м}^3/\text{кг}$	Pr
0	1,043	2,28	1,295	0,72
100	1,068	3,12	0,950	0,69
200	1,097	4,00	0,748	0,67
300	1,122	4,83	0,617	0,65
400	1,151	5,68	0,525	0,64
500	1,185	6,54	0,457	0,63
600	1,214	7,40	0,405	0,62
700	1,239	8,25	0,363	0,61
800	1,264	9,13	0,330	0,60
900	1,290	9,98	0,301	0,59
1000	1,306	10,9	0,275	0,58
1100	1,323	11,75	0,257	0,57
1200	1,340	12,62	0,240	0,56

Приложение Б

Физические параметры для сухого воздуха при давлении 101 325 Па

T, K	$\rho, \text{кг}/\text{м}^3$	$C_p, \text{кДж}/(\text{кг}\cdot^\circ\text{C})$	$\lambda \cdot 10^2, \text{Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$	$\nu \cdot 10^6, \text{м}^2/\text{с}$	Pr
263	1,342	1,009	2,361	12,43	0,712
273	1,293	1,005	2,442	13,28	0,707
283	1,247	1,005	2,512	14,16	0,705
293	1,205	1,005	2,593	15,06	0,703
303	1,165	1,005	2,675	16,00	0,701
313	1,128	1,005	2,756	16,96	0,699
323	1,093	1,005	2,826	17,95	0,698
333	1,060	1,005	2,896	18,97	0,696
343	1,029	1,009	2,966	20,02	0,694
353	1,000	1,009	3,047	21,09	0,692
363	0,972	1,009	3,128	22,10	0,69
373	0,946	1,009	3,200	23,13	0,688
393	0,898	1,009	3,338	25,45	0,686
413	0,854	1,013	3,489	27,80	0,684
433	0,815	1,017	3,640	30,09	0,682
453	0,779	1,021	3,780	32,49	0,681
473	0,746	1,026	3,931	34,85	0,680
523	0,674	1,038	4,268	40,61	0,677
573	0,615	1,047	4,606	48,33	0,674

Приложение В

Смеси горючих материалов

№	Наименование групп помещений или зон расположения пожарной нагрузки	Низшая теплота сгорания	Линейная скорость	Удельная скорость	Дымообразующая способность	Потребление O_2	Выделение CO_2	Выделение CO	Выделение HCl
		$Q_{pн}$	v	Ψ	Dm	Lo_2	L_{CO_2}	L_{CO}	L_{HCl}
		МДж/кг	м/с	кг/м ² с	Нп×м ² /кг	кг/кг	кг/кг	кг/кг	кг/кг
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	Административные помещения (Ф1.1–1 дошкольные образовательные учреждения)	14	0,005	0,014	47,7	-1,369	1,478	0,03	0,006
2	Административные помещения (Ф1.1–2 больницы, дома престарелых и инвалидов)	14	0,005	0,014	47,7	-1,69	1,478	0,03	0,006
3	Административные помещения (Ф2.1 – театры, концертные залы и другие учреждения для посетителей в закрытых помещениях)	14	0,005	0,014	48	-1,369	1,478	0,03	0,006
4	Административные помещения магазина (Ф3.1 – здания организаций торговли)	14	0,005	0,014	48	-1,369	1,478	0,03	0,006
5	Административные помещения (Ф3.2 – здания организаций общественного питания)	14	0,005	0,014	48	-1,369	1,478	0,03	0,006
6	Административные помещения (Ф3.3 – вокзалы)	14	0,005	0,014	48	-1,369	1,478	0,03	0,006
7	Административные помещения (Ф3.4 – поликлиники и амбулатории)	14	0,005	0,014	48	-1369	1,478	0,03	0,006

Продолжение таблицы

№	Наименование групп помещений или зон расположения пожарной нагрузки	Низшая теплота сгорания	Линейная скорость	Удельная скорость	Дымообразующая способность	Потребление O_2	Выделение CO_2	Выделение CO	Выделение HCl
		$Q_{pн}$	v	Ψ	Dm	L_{O2}	L_{CO2}	L_{CO}	L_{HCl}
		МДж/кг	м/с	кг/м ² с	Нп×м ² /кг	кг/кг	кг/кг	кг/кг	кг/кг
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
8	Административные помещения (Ф3.5 – помещения организаций бытового и коммунального обслуживания)	14	0,005	0,014	48	-1,369	1,478	0,03	0,006
9	Административные помещения (Ф3.6 – физкультурно-оздоровительные комплексы и спортивно-тренировочные с помещениями без трибун для зрителей, бытовые помещения, бани)	14	0,005	0,014	48	-1,369	1,478	0,03	0,006
10	Административные помещения (Ф5.1 – производственные здания, сооружения, производственные и лабораторные помещения, мастерские)	14	0,005	0,014	48	-1,369	1,478	0,03	0
11	Аптечный киоск (Ф 3.4 – поликлиники и амбулатории)	23,5	0,004	0,013	172	-1,7	0,679	0,112	0,004

Продолжение таблицы

№	Наименование групп помещений или зон расположения пожарной нагрузки	Низшая	Линейная	Удельная	Дымо	Потребление	Выделение	Выделение	Выделение
		$Q_{pн}$	v	Ψ	образу	Lo_2	Lco_2	Lco	$Lncl$
		МДж/ кг	м/с	кг/м ² с	ющая способност ь	кг/кг	кг/кг	кг/кг	кг/кг
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
12	Архивы (Ф4.3 – Ф5.2)	14,5	0,01	0,011	50	-1,154	1,109	0,097	0
13	Аудитория (Ф4.2 – здания образовательных организаций высшего образования, организаций дополнительного профессионального образования)	14	0,005	0,014	48	-1,369	1,478	0,03	0,006
14	Вестибюль, зона отдыха (Ф4.1 – здания общеобразовательных организаций, организаций дополнительного образования детей, профессиональных образовательных организаций)	14,4	0,015	0,014	84	-1,288	1,55	0,037	0,004
15	Выставочный зал автосалона (Ф3.1 – здания организаций торговли)	31,7	0,007	0,023	487	-2,64	1,3	0,097	0,011
16	Гардероб (Ф2.1 – театры, кинотеатры и другие учреждения с расчетным числом посадочных мест для посетителей в закрытых помещениях)	16,7	0,007	0,009	61	-2,56	0,88	0,063	0
17	Гардероб (Ф1.1–1 дошкольные образовательные учреждения)	16,7	0,007	0,024	61	-2,56	0,88	0,063	0

Продолжение таблицы

№	Наименование групп помещений или зон расположения пожарной нагрузки	<i>Низшая теплота</i>	<i>Линейная скорость</i>	<i>Удельная скорость</i>	<i>Дымообразующая способность</i>	<i>Потребление O₂</i>	<i>Выделение CO₂</i>	<i>Выделение CO</i>	<i>Выделение HCL</i>
		Q_{Рн}	v	Ψ	Dm	Lo₂	Lco₂	Lco	Lhcl
		МДж/кг	м/с	кг/м ² с	Нп×м ² /кг	кг/кг	кг/кг	кг/кг	кг/кг
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
18	Гардероб (Ф2.2-1 музеи, выставки)	16,7	0,007	0,009	61	-2,56	0,88	0,063	0
19	Гардероб (Ф3.2 – здания организаций общественного питания)	16,7	0,007	0,009	61	-2,56	0,88	0,063	0
20	Гардероб (Ф3.4 – поликлиники и амбулатории)	16,7	0,007	0,009	61	-2,56	0,88	0,063	0
21	Гардероб (Ф4.1 – здания общеобразовательных организаций, организаций дополнительного образования детей)	16,7	0,007	0,009	61	-2,56	0,88	0,063	0
22	Гардероб (Ф4.2 – здания образовательных организаций высшего образования, организаций дополнительного профессионального образования)	16,7	0,007	0,009	61	-2,56	0,88	0,063	0
23	Жилая комната, гостиная, кухня-столовая (Ф1.4 – многоквартирные жилые дома)	13,8	0,005	0,015	270	-1,03	0,203	0,002	0,014
24	Зал музея (Ф2.2-1 Музеи, выставки)	13,8	0,006	0,015	270	-1,03	0,203	0,002	0,014
25	Зал книжного магазина, магазина	14,5	0,01	0,011	50	-1,154	1,109	0,097	0

	(Ф3.1 – здания организаций торговли)								
--	--------------------------------------	--	--	--	--	--	--	--	--

Продолжение таблицы

№	Наименование групп помещений или зон расположения пожарной нагрузки	Низшая теплота	Линейная скорость	Удельная скорость	Дымообразующая способность	Потребление O_2	Выделение CO_2	Выделение CO	Выделение HCL
		Q_{P_n}	v	Ψ	D_m	L_{O_2}	L_{CO_2}	L_{CO}	L_{HCl}
		МДж/кг	м/с	кг/м ² с	Нп×м ² /кг	кг/кг	кг/кг	кг/кг	кг/кг
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
26	Зал магазина негорючих материалов (посуда, сантехника и т.д.) (Ф3.1 – здания торговли)	23,5	0,004	0,013	172	-1,7	0,679	0,112	0,004
27	Зал мебельного магазина (Ф3.1 – здания организаций торговли)	14,4	0,015	0,014	84	-1,288	1,55	0,037	0,004
28	Зал продуктового магазина (Ф3.1 – здания организаций торговли)	23,5	0,004	0,013	172	-1,7	0,679	0,112	0,004
29	Залы без закрепленных посадочных мест (Ф2.2–2 Зальные помещения)	14	0,015	0,014	48	-1,369	1,478	0,03	0,006
30	Зал ожидания (Ф3.3 – вокзалы)	13,8	0,006	0,015	270	-1,03	0,203	0,002	0,014
31	Зал ожидания (Ф3.5 – помещения организаций бытового и коммунального обслуживания)	16,7	0,007	0,024	61	-2,56	0,88	0,063	0
32	Зона отдыха/ожидания (Ф3.4 – поликлиники и амбулатории)	14,4	0,015	0,014	84	-1,288	1,55	0,037	0,004
33	Зона администратора, обслуживания клиентов (Ф1.2 – гостиницы, общежития, спальные корпуса санаториев и	14	0,005	0,014	48	-1,369	1,478	0,03	0,006

	домов отдыха общего типа, кемпингов, мотелей и пансионатов)								
--	---	--	--	--	--	--	--	--	--

Продолжение таблицы

№	Наименование групп помещений или зон расположения пожарной нагрузки	Низшая теплота	Линейная скорость	Удельная скорость	Дымообразующая способность	Потребление O_2	Выделение CO_2	Выделение CO	Выделение HCL
		$Q_{pн}$	v	Ψ	Dm	L O_2	L CO_2	L CO	L HCl
		МДж/кг	м/с	кг/м ² с	Нп×м ² /кг	кг/кг	кг/кг	кг/кг	кг/кг
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
34	Зона отдыха, ожидания (Ф1.2 – гостиницы, общежития, спальные корпуса санаториев и домов отдыха общего типа, кемпингов, мотелей и пансионатов)	14,4	0,015	0,014	84	-1,288	1,55	0,037	0,004
35	Зона администратора, обслуживания посетителей (Ф3.6 – физкультурно-оздоровительные комплексы и спортивно-тренировочные учреждения с помещениями без трибун для зрителей, бытовые помещения, бани)	14	0,005	0,014	48	-1,369	1,478	0,03	0,006
35	Зона хранения грузовых автомобилей, автобусов (Ф5.2 – складские здания, сооружения, стоянки для автомобилей без технического обслуживания и ремонта, книгохранилища, архивы, складские помещения)	31,7	0,007	0,023	487	-2,64	1,3	0,097	0,011
37	Зона хранения легковых автомобилей (Ф5.2 – складские здания, сооружения, стоянки для автомобилей без технического	31,7	0,007	0,023	487	-2,64	1,3	0,097	0,011

обслуживания и ремонта, книгохранилища, архивы, складские помещения)								
--	--	--	--	--	--	--	--	--

Продолжение таблицы

№	Наименование групп помещений или зон расположения пожарной нагрузки	Низшая теплота	Линейная скорость	Удельная скорость	Дымообразующая способность	Потребление O_2	Выделение CO_2	Выделение CO	Выделение HCL
		$Q_{pн}$	v	Ψ	Dm	Lo_2	Lco_2	Lco	$Lncl$
		МДж/кг	м/с	кг/м ² с	Нп×м ² /кг	кг/кг	кг/кг	кг/кг	кг/кг
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
38	Зрительный зал (Ф2.1 – театры, кинотеатры, концертные залы, клубы, цирки, спортивные сооружения с трибунами, библиотеки и другие учреждения с расчётным числом посадочных мест для посетителей в закрытых помещениях)	13,8	0,006	0,015	270	-1,03	0,203	0,002	0,014
39	Игровая комната (Ф1.1–1 дошкольные образовательные учреждения)	14,4	0,015	0,014	84	-1,288	1,55	0,037	0,004
40	Кабинет врача (Ф1.1–2 больницы, дома престарелых и инвалидов)	14	0,005	0,014	47,7	-1,369	1,478	0,03	0,006
41	Административное помещение (Ф4.3 – здания органов управления учреждений, проектно-конструкторских	14	0,005	0,014	48	-1,369	1,478	0,03	0,006

	организаций, информационных и редакционно-издательских организаций, научных организаций, банков, контор, офисов)								
42	Кассы (Ф3.3 – вокзалы)	14	0,005	0,014	48	-1,369	1,478	0,03	0,006

Продолжение таблицы

№	Наименование групп помещений или зон расположения пожарной нагрузки	Низшая теплота	Линейная скорость	Удельная скорость	Дымообразующая способность	Потребление O_2	Выделение CO_2	Выделение CO	Выделение HCL
		$Q_{pн}$	v	Ψ	Dm	L O_2	L CO_2	L CO	L HCl
		МДж/кг	м/с	кг/м ² с	Нп×м ² /кг	кг/кг	кг/кг	кг/кг	кг/кг
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
43	Квартира общей площадью до 100 м ² (Ф1.3 – многоквартирные жилые дома)	13,8	0,005	0,015	270	-1,03	0,203	0,002	0,014
44	Квартира общей площадью более 100м ² (Ф1.3 – многоквартирные жилые дома)	13,8	0,005	0,015	270	-1,03	0,203	0,002	0,014
45	Киоск печатной продукции (Ф3.1 – здания организаций торговли)	14,5	0,006	0,011	50	-1,154	1,109	0,097	0
46	Киоск продуктовых товаров (Ф3.1 – здания организаций торговли)	23,5	0,004	0,013	172	-1,7	0,679	0,112	0,004
47	Киоск промтоваров (Ф3.1 – здания организаций торговли)	16,7	0,007	0,024	61	-2,56	0,88	0,063	0
48	Кладовая белья (Ф1.1-1 дошкольные образовательные учреждения)	16,7	0,007	0,024	61	-2,56	0,88	0,063	0

49	Кладовая негорючих материалов (Ф1.2 – гостиницы, общежития, спальные корпуса санаториев и домов отдыха общего типа, кемпингов, мотелей и пансионатов)	23,5	0,004	0,013	172	-1,7	0,679	0,112	0,004
----	---	------	-------	-------	-----	------	-------	-------	-------

Продолжение таблицы

№	Наименование групп помещений или зон расположения пожарной нагрузки	Низшая	Линейная	Удельная	Дымо	Потребление	Выделение	Выделение	Выделение
		теплота	скорость	скорость	образу	O ₂	CO ₂	CO	HCL
		Q _{pн}	v	Ψ	Dm	Lo ₂	Lco ₂	Lco	Lncl
		МДж/кг	м/с	кг/м ² с	Нп×м ² /кг	кг/кг	кг/кг	кг/кг	кг/кг
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
50	Кладовая (Ф1.4 – многоквартирные жилые дома, в том числе блокированные)	20,7	0,01	0,018	155	-1,52	0,97	0,094	0,005
51	Кладовая бакалеи (Ф3.2 – здания организаций общественного питания)	17	0,005	0,008	1096	-0,968	0,812	0,163	0
52	Кладовая белья (Ф3.2 – здания организаций общественного питания)	16,7	0,007	0,024	61	-2,56	0,88	0,063	0
53	Кладовая негорючих материалов (посуда, заморозка и т.д.) (Ф3.2 – здания организаций общественного питания)	23,5	0,004	0,013	172	-1,7	0,679	0,112	0,004
54	Кладовая белья (Ф3.4 – поликлиники и амбулатории)	16,7	0,007	0,024	61	-2,56	0,88	0,063	0
55	Кладовая, подсобное помещение (Ф4.3 – здания органов управления)	14,5	0,01	0,011	50	-1,154	1,109	0,097	0

56	Камера хранения (Ф3.3 – вокзалы)	20,7	0,01	0,018	155	-1,52	0,97	0,094	0,005
----	-------------------------------------	------	------	-------	-----	-------	------	-------	-------

Продолжение таблицы

№	Наименование групп помещений или зон расположения пожарной нагрузки	Низшая теплота	Линейная скорость	Удельная скорость	Дымообразующая способность	Потребление O_2	Выделение CO_2	Выделение CO	Выделение HCL
		$Q_{pн}$	v	Ψ	Dm	L O_2	L CO_2	L CO	L HCl
		МДж/кг	м/с	кг/м ² с	Нп×м ² /кг	кг/кг	кг/кг	кг/кг	кг/кг
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
57	Книгохранилище (Ф2.1 – театры, кинотеатры, клубы, цирки, спортивные сооружения с трибунами, библиотеки и другие учреждения с расчетным числом посадочных мест для посетителей в закрытых помещениях)	14,5	0,01	0,011	50	-1,154	1,109	0,097	0
58	Комната отдыха (Ф1.1-2 больницы, дома престарелых и инвалидов)	14,4	0,015	0,014	84	-1,288	1,55	0,037	0,004
59	Комната хранения личных вещей (Ф1.1-2 больницы, дома престарелых и инвалидов)	20,7	0,01	0,018	155	-1,52	0,97	0,094	0,005
60	Костюмерная (Ф2.1 – театры, кинотеатры, концертные залы, клубы, цирки, спортивные сооружения с трибунами, библиотеки и другие учреждения с расчетным числом посадочных мест для посетителей в	16,7	0,007	0,024	61	-2,56	0,88	0,063	0

	закрытых помещениях)								
--	----------------------	--	--	--	--	--	--	--	--

Продолжение таблицы

№	Наименование групп помещений или зон расположения пожарной нагрузки	<i>Низшая теплота</i>	<i>Линейная скорость</i>	<i>Удельная скорость</i>	<i>Дымо образу ющая способно сть</i>	<i>Потребление O₂</i>	<i>Выделение CO₂</i>	<i>Выделение CO</i>	<i>Выделение HCL</i>
		Q_{пн}	v	Ψ	Dm	Lo₂	Lco₂	Lco	Lhcl
		МДж/ кг	м/с	кг/м ² с	Нп×м ² /кг	кг/кг	кг/кг	кг/кг	кг/кг
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
61	Комната переговоров (Ф4.3 – здания органов управления учреждений) организаций)	14	0,005	0,014	48	-1,369	1,478	0,03	0,006
62	Кратковременное складирование мебели и материалов (нагрузки не предусмотренные нормальным режимом)	14,4	0,015	0,014	84	-1,288	1,55	0,037	0,004
63	Кратковременное складирование строительных и ремонтных материалов (нагрузки не предусмотренные нормальным режимом)	15,4	0,021	0,013	150	-2,55	1,225	0,207	0,004
64	Кратковременное складирование тары и упаковки в (нагрузки не предусмотренные нормальным режимом)	23,5	0,004	0,013	172	-1,7	0,679	0,112	0,004

65	Кухня (электрические плиты) (Ф3.2 – здания организаций общественного питания)	14,4	0,015	0,014	84	-1,288	1,55	0,037	0,004
66	Лаборатория (Ф4.2 – здания образовательных организаций высшего образования)	14	0,016	0,015	53	-1,218	1,423	0,023	0
67	Лечебные/процедурные кабинеты (Ф1.1-2 больницы, дома престарелых и инвалидов)	14,4	0,015	0,014	84	-1,288	1,55	0,037	0,004

Продолжение таблицы

№	Наименование групп помещений или зон расположения пожарной нагрузки	Низшая теплота	Линейная скорость	Удельная скорость	Дымообразующая способность	Потребление O_2	Выделение CO_2	Выделение CO	Выделение HCL
		$Q_{pн}$	v	Ψ	Dm	L O_2	L CO_2	L CO	L hcl
		МДж/кг	м/с	кг/м ² с	Нп×м ² /кг	кг/кг	кг/кг	кг/кг	кг/кг
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
68	Медицинские кабинеты (Ф3.4 – поликлиники и амбулатории)	14	0,005	0,014	48	-1,369	1,478	0,03	0,006
69	Несанкционированное хранение (мебель, бытовые приборы, хозяйственные материалы) (нагрузки не предусмотренные нормальным режимом)	14,4	0,015	0,014	84	-1,288	1,55	0,037	0,004
70	Несанкционированное хранения (автомобильные шины и расходные материалы) (нагрузки не предусмотренные нормальным режимом)]	36	0,018	0,011	850	-2,99	0,416	0,015	0

71	Новогодняя ёлка [Кратковременные смеси горючих материалов - Праздничные и рекламные мероприятия]	20,7	0,01	0,018	155	-1,52	0,97	0,094	0,005
72	Обеденный зал (Ф3.2 – здания организаций общественного питания)	13,8	0,005	0,015	82	-1,437	1,285	0,002	0,006
73	Палата (Ф1.1-2 больницы, дома престарелых и инвалидов)	16,7	0,007	0,024	61	-2,56	0,88	0,063	0
74	Парикмахерская (Ф3.5 – помещения организаций бытового и коммунального обслуживания)	14,4	0,015	0,014	84	-1,288	1,55	0,037	0,004

Продолжение таблицы

№	Наименование групп помещений или зон расположения пожарной нагрузки	<i>Низшая теплота</i>	<i>Линейная скорость</i>	<i>Удельная скорость</i>	<i>Дымо образу ющая спосо бност ь</i>	<i>Потребление O₂</i>	<i>Выделение CO₂</i>	<i>Выделение CO</i>	<i>Выделение HCL</i>
		Q_{Рн}	v	Ψ	Dm	L_{O2}	L_{CO2}	L_{CO}	L_{HCl}
		МДж/ кг	м/с	кг/м ² с	Нп×м ² /кг	кг/кг	кг/кг	кг/кг	кг/кг
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
75	Подсобные помещения (Ф1.1–3 спальные корпуса образовательных учреждений и детских учреждений)	20,7	0,01	0,018	155	-1,52	0,97	0,094	0,005
76	Подсобные помещения, кладовые (Ф2.1 – театры, кинотеатры, концертные залы, клубы, цирки, спортивные сооружения с трибунами, библиотеки и другие учреждения с расчётным числом посадочных мест для посетителей)	20,7	0,01	0,018	155	-1,52	0,97	0,094	0,005

77	Подсобные помещения, кладовые (Ф3.1 – здания организаций торговли)	20,7	0,01	0,018	155	-1,52	0,97	0,094	0,005
78	Подсобные помещения, кладовые (Ф3.2 – здания организаций общественного питания)	20,7	0,01	0,018	155	-1,52	0,97	0,094	0,005
79	Подсобные помещения, кладовые (Ф3.3 – вокзалы)	20,7	0,01	0,018	155	-1,52	0,97	0,094	0,005
80	Подсобные помещения, кладовые (Ф3.4 – поликлиники и амбулатории)	20,7	0,01	0,018	155	-1,52	0,97	0,094	0,005

Продолжение таблицы

№	Наименование групп помещений или зон расположения пожарной нагрузки	Низшая теплота	Линейная скорость	Удельная скорость	Дымообразующая способность	Потребление O_2	Выделение CO_2	Выделение CO	Выделение HCL
		$Q_{pн}$	v	Ψ	Dm	L O_2	L CO_2	Lco	Lncl
		МДж/кг	м/с	кг/м ² с	Нп×м ² /кг	кг/кг	кг/кг	кг/кг	кг/кг
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
81	Подсобные помещения (Ф3.5 – помещения организаций бытового и коммунального обслуживания)	20,7	0,01	0,018	155	-1,52	0,97	0,094	0,005
82	Почта (Ф3.5 – помещения организаций бытового и коммунального обслуживания)	20,7	0,01	0,018	155	-1,52	0,97	0,094	0,005
83	Подсобные помещения, кладовые	20,7	0,01	0,018	155	-1,52	0,97	0,094	0,005
84	Приёмный пункт	16,7	0,007	0,024	61	-2,56	0,88	0,063	0
85	Производство фанеры (Ф5.1 – производственные здания, сооружения, производственные и лабораторные	16,1	0,019	0,012	81	-1,177	1,055	0,072	0

	помещения, мастерские)								
86	Раздевалка, гардероб (Ф3.6 – физкультурно-оздоровительные комплексы и спортивно-тренировочные и спортивно-тренировочные учреждения с помещениями без трибун, бытовые помещения, бани)	16,7	0,007	0,009	61	-2,56	0,88	0,063	0
87	Регистратура, архив (Ф3.4 – поликлиники и амбулатории)	14,5	0,01	0,011	50	-1,154	1,109	0,097	0

Продолжение таблицы

№	Наименование групп помещений или зон расположения пожарной нагрузки	Низшая	Линейная	Удельная	Дымо	Потребление	Выделение	Выделение	Выделение
		теплота	скорость	скорость	образу	O ₂	CO ₂	CO	HCL
		Q _{Рн}	v	Ψ	Dm	L _{O2}	L _{CO2}	L _{CO}	L _{HCL}
1	2	МДж/кг	м/с	кг/м ² с	Нп×м ² /кг	кг/кг	кг/кг	кг/кг	кг/кг
88	Склад музея (Ф2.2-1 Музеи, выставки)	13,8	0,008	0,015	270	-1,03	0,203	0,002	0,014
89	Склад аптеки (Ф3.1 – здания организаций торговли)	23,5	0,005	0,013	172	-1,7	0,679	0,112	0,004
90	Склад книжного магазина, магазина канцтоваров (Ф3.1 – здания организаций торговли)	14,5	0,013	0,011	50	-1,154	1,109	0,097	0
91	Склад магазина бытовой техники, электроники (Ф3.1 – здания организаций торговли)	25	0,009	0,024	635	-2,19	0,398	0,109	0,025
92	Склад магазина промышленных товаров (Ф3.1 – здания организаций торговли)	16,7	0,009	0,024	61	-2,56	0,88	0,063	0

93	Склад мебельного магазина (Ф3.1 – здания организаций торговли)	14,4	0,02	0,014	84	-1,288	1,55	0,037	0,004
94	Склад продуктового магазина (Ф3.1 – здания организаций торговли)	23,5	0,005	0,013	172	-1,7	0,679	0,112	0,004
95	Склад бумаги в рулонах (Ф5.2 – складские здания, сооружения, стоянки для автомобилей без технического обслуживания и ремонта, книгохранилища, архивы, складские помещения)	15,1	0,005	0,008	41	-1,158	0,664	0,108	0

Продолжение таблицы

№	Наименование групп помещений или зон расположения пожарной нагрузки	<i>Низшая теплота</i>	<i>Линейная скорость</i>	<i>Удельная скорость</i>	<i>Дымообразующая способность</i>	<i>Потребление O₂</i>	<i>Выделение CO₂</i>	<i>Выделение CO</i>	<i>Выделение HCL</i>
		Q_{рн}	v	Ψ	Dm	Lo₂	Lco₂	Lco	Lhcl
		МДж/кг	м/с	кг/м ² с	Нп×м ² /кг	кг/кг	кг/кг	кг/кг	кг/кг
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
96	Склад кабельной и электротехнической продукции (Ф5.2 –)	25	0,009	0,024	635	-2,19	0,398	0,109	0,025
97	Склад льноволокна (Ф5.2)	15,7	0,071	0,021	3,4	-1,83	0,36	0,004	0
98	Склад мебели (Ф5.2 – ...)	14,4	0,02	0,014	84	-1,288	1,55	0,037	0,004
99	Склад одежды (Ф5.2 – ...)	16,7	0,009	0,024	61	-2,56	0,88	0,063	0
100	Склад оргстекла (Ф5.2 – ...)	26,4	0,008	0,004	78	-2,09	1,795	0,127	0
101	Склад резинотехнических изделий (Ф5.2 – складские здания, сооружения, стоянки для автомобилей без	36	0,018	0,011	850	-2,99	0,416	0,015	0

	технического обслуживания и ремонта, книгохранилища, архивы, складские помещения)								
102	Склад хлопка в тюках (Ф5.2 – складские здания, сооружения, стоянки для автомобилей без технического обслуживания и ремонта, книгохранилища, архивы, складские помещения)	16,7	0,004	0,017	0,6	-1,15	0,578	0,005	0
103	Спальная комната (Ф1.1-1 дошкольные образовательные учреждения)	16,7	0,007	0,024	61	-2,56	0,88	0,063	0

Продолжение таблицы

№	Наименование групп помещений или зон расположения пожарной нагрузки	<i>Низшая теплота</i>	<i>Линейная скорость</i>	<i>Удельная скорость</i>	<i>Дымообразующая способность</i>	<i>Потребление O₂</i>	<i>Выделение CO₂</i>	<i>Выделение CO</i>	<i>Выделение HCL</i>
		Q _{pн}	v	Ψ	Dm	Lo ₂	Lco ₂	Lco	Lncl
		МДж/кг	м/с	кг/м ² с	Нп×м ² /кг	кг/кг	кг/кг	кг/кг	кг/кг
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
104	Спальная комната (Ф1.1-3 спальные корпуса образовательных учреждений интернатного типа и детских учреждений)	13,8	0,005	0,015	270	-1,03	0,203	0,002	0,014
105	Спортзал, танцевальный зал (Ф1.1-1 дошкольные образовательные учреждения)	16,7	0,005	0,014	61	-2,56	0,88	0,063	0
106	Спортзал (Ф3.6 – физкультурно-оздоровительные комплексы и спортивно-тренировочные и спортивно-тренировочные учреждения с	16,7	0,005	0,014	61	-2,56	0,88	0,063	0

	помещениями без трибун для зрителей, бытовые помещения, бани)								
107	Сцена [Кратковременные смеси горючих материалов – Праздничные и рекламные мероприятия]	13,8	0,037	0,015	57	-1,15	1,57	0,024	0
108	Сценическая часть (Ф2.1 – театры, кинотеатры и другие учреждения с расчётным числом посадочных мест для посетителей в закрытых помещениях)	13,8	0,037	0,015	57	-1,15	1,57	0,024	0

Продолжение таблицы

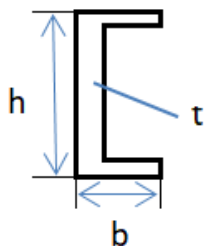
№	Наименование групп помещений или зон расположения пожарной нагрузки	Низшая	Линейная	Удельная	Дымо	Потребление	Выделение	Выделение	Выделение
		теплота	скорость	скорость	образу	O ₂	CO ₂	CO	HCL
		Q _{рн}	v	Ψ	Dm	Lo ₂	Lco ₂	Lco	Lncl
1	2	МДж/кг	м/с	кг/м ² с	Нп×м ² /кг	кг/кг	кг/кг	кг/кг	кг/кг
3	4	5	6	7	8	9	10		
109	Техобслуживание автомобилей (Ф5.1 – производственные здания, сооружения, производственные и лабораторные помещения, мастерские)	36	0,018	0,011	850	-2,99	0,416	0,015	0
110	Торговый зал аптеки (Ф3.1 – здания организаций торговли)	23,5	0,004	0,013	172	-1,7	0,679	0,112	0,004
111	Торговый зал автомагазина (запчасти, аксессуары, расходные материалы)	36	0,018	0,011	850	-2,99	0,416	0,015	0
112	Торговый зал магазина бытовой техники, электроники (Ф3.1 – здания организаций торговли)	25	0,007	0,024	635	-2,19	0,398	0,109	0,025

113	Торговый зал магазина промышленных товаров (Ф 3.1 – здания организаций торговли)	16,7	0,007	0,024	61	-2,56	0,88	0,063	0
114	Трибуны спортивных сооружений (Ф 2.1 – театры, кинотеатры, и другие учреждения с расчётным числом посадочных мест для посетителей в закрытых помещениях)	26,4	0,004	0,014	78	-2,09	1,8	0,127	0
115	Учебный класс, аудитория (Ф 4.1 – здания общеобразовательных организаций, организаций дополнительного образования детей)	14	0,005	0,014	48	-1,369	1,478	0,03	0,006

Продолжение таблицы

№	Наименование групп помещений или зон расположения пожарной нагрузки	<i>Низшая теплота</i>	<i>Линейная скорость</i>	<i>Удельная скорость</i>	<i>Дымообразующая способность</i>	<i>Потребление O₂</i>	<i>Выделение CO₂</i>	<i>Выделение CO</i>	<i>Выделение HCL</i>
		Q_{pн}	v	Ψ	Dm	Lo₂	Lco₂	Lco	Lncl
		МДж/кг	м/с	кг/м ² с	Нп×м ² /кг	кг/кг	кг/кг	кг/кг	кг/кг
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
116	Цех деревообработки	13,8	0,022	0,015	57	-1,15	1,57	0,024	0
117	Цех сушки древесины	13,8	0,038	0,015	57	-1,15	1,57	0,024	0
118	Читальный зал (Ф2.1 – театры, кинотеатры)	14,5	0,01	0,011	50	-1,154	1,109	0,097	0

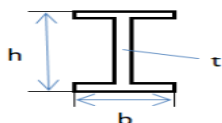
**ШВЕЛЛЕРЫ СТАЛЬНЫЕ ГОРЯЧЕКАТАНЫЕ СОРТАМЕНТ
(ГОСТ 8240-89)**



№	Размеры, мм			J_x ,	W_x , см ³	i_x ,	S_x ,	J_y ,	W_y , см ³	i_y ,	z_0 , см
	h	b	t	см ⁴		см	см ³	см ⁴		см	
5	50	32	4,4	22,8	9,1	1,92	5,59	5,61	2,75	0,95	1,16
6,5	65	36	4,4	48,6	15	2,54	9	8,7	3,68	1,08	1,24
8	80	40	4,5	89,4	22,4	3,16	13,3	12,8	4,75	1,19	1,31
10	100	46	4,5	174	34,8	3,99	20,4	20,4	6,46	1,37	1,44
12	120	52	4,8	304	50,6	4,78	29,6	31,2	8,52	1,53	1,54
14	140	58	4,9	491	70,2	5,6	40,8	45,4	11	1,7	1,67
16	160	64	5	747	93,4	6,42	54,1	63,3	13,8	1,87	1,8
16a	160	68	5	823	103	6,49	59,4	78,8	16,4	2,01	2
18	180	70	5,1	1 090	121	7,24	69,8	86	17	2,04	1,94
18a	180	74	5,1	1 190	132	7,32	76,1	105	20	2,18	2,13
20	200	76	5,2	1 520	152	8,07	87,8	113	20,5	2,2	2,07
22	220	82	5,4	2 110	192	8,89	110	151	25,1	2,37	2,21
24	240	90	5,6	2 900	242	9,73	139	208	31,6	2,6	2,42
27	270	95	6	4 160	308	10,9	178	262	37,3	2,73	2,47
30	300	100	6,5	5 810	387	12	224	327	43,6	2,84	2,52
33	330	105	7	7 980	484	13,1	281	410	51,8	2,97	2,59
36	360	110	7,5	10 820	601	14,2	350	513	61,7	3,1	2,68

J_x, J_y – осевые моменты инерции; W_x, W_y – осевые моменты сопротивления;
 i_x, i_y – радиусы инерции; S_x – статический момент полусечения; z_0 – абсцисса ц.т.

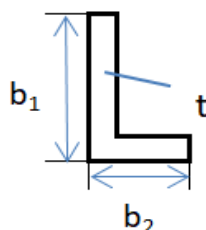
ГОСТ 8239-89 ДВУТАВРЫ СТАЛЬНЫЕ ГОРЯЧЕКАТАННЫЕ



Номер адвутавр	Размеры			Справочные значения для осей						
	h	b	t	X – X				Y – Y		
				I _x ,	W _x ,	i _x ,	S _x ,	I _y ,	W _y ,	i _y ,
	мм			см ⁴	см ³	см	см ³	см ⁴	см ³	см
10	100	55	4,5	198	39,7	4,06	23	17,9	6,49	1,22
12	120	64	4,8	350	58,4	4,88	33,7	27,9	8,72	1,38
14	140	73	4,9	572	81,7	5,73	46,8	41,9	11,5	1,55
16	160	81	5	873	109	6,57	62,3	58,6	14,5	1,7
18	180	90	5,1	1 290	143	7,42	81,4	82,6	18,4	1,88
20	200	100	5,2	1 840	184	8,28	104	115	23,1	2,07
22	220	110	5,4	2 550	232	9,13	131	157	28,6	2,27
24	240	115	5,6	3 460	289	9,97	163	198	34,5	2,37
27	270	125	6	5 010	371	11,2	210	260	41,5	2,54
30	300	135	6,5	7 080	472	12,3	268	337	49,9	2,69
33	330	140	7	9 840	597	13,5	339	419	59,9	2,79
36	360	145	7,5	13 380	743	14,7	423	516	71,1	2,89
40	400	155	8,3	19 062	953	16,2	545	667	86,1	3,03
45	450	160	9	27 696	1 231	18,1	708	808	101	3,09
50	500	170	10	39 727	1 589	19,9	919	1 043	123	3,23
55	550	180	11	55 962	2 035	21,8	1181	1356	151	3,39
60	600	190	12	76 806	2 560	23,6	1491	1725	182	3,54

В табл. используют обозначения: I – момент инерции; W – момент сопротивления; i – радиус инерции, s – статический момент полусечения

УГОЛКИ СТАЛЬНЫЕ ГОРЯЧЕКАТАНЫЕ РАВНОПОЛОЧНЫЕ
($b_1=b_2=b$)



Номер уголка	b	t	Справочные значения величин для осей									
			$x - x$			$x_0 - x_0$		$y_0 - y_0$			$I_{xy}, \text{см}^4$	$x_0, \text{см}$
	мм		$I_x, \text{см}^4$	$W_x, \text{см}^3$	$i_x, \text{см}$	$I_{x0} \max, \text{см}^4$	$i_{x0} \max, \text{см}$	$I_{y0} \min, \text{см}^4$	$W_{y0}, \text{см}^3$	$i_{y0} \min, \text{см}$		
2	20	3	0,4	0,28	0,59	0,63	0,75	0,17	0,2	0,39	0,23	0,6
2,5	25	3	0,81	0,46	0,75	1,29	0,95	0,34	0,33	0,49	0,47	0,73
2,8	28	3	1,16	0,58	0,85	1,84	1,07	0,48	0,42	0,55	0,68	0,8
3	30	3	1,45	0,67	0,91	2,3	1,15	0,6	0,53	0,59	0,85	0,85
3,2	32	3	1,77	0,77	0,97	2,8	1,23	0,74	0,59	0,63	1,03	0,89
4	40	4	4,58	1,6	1,22	7,26	1,53	1,9	1,19	0,78	2,68	1,13
5	50	5	11,2	3,13	1,53	17,77	1,92	4,63	2,3	0,98	6,57	1,42
10	100	8	147,19	20,3	3,07	233,46	3,87	60,92	15,66	1,98	86,3	2,75
11	110	8	198,17	24,77	3,39	314,51	4,28	81,83	19,29	2,18	116	3
14	140	12	602,49	59,66	4,31	956,98	5,43	248,01	44,97	2,76	354	3,9
16	160	18	1290,24	114,24	4,87	2061,03	6,13	537,46	82,08	3,13	771	4,63
18	180	11	1216,44	92,47	5,6	1933,1	7,06	499,78	72,86	3,59	716	4,85
20	200	20	2871,47	200,37	6,12	4860,42	7,72	1181,92	146,62	3,93	1689	5,7
22	220	16	3175,44	198,71	6,8	5045,37	8,58	1305,52	153,34	4,36	1869	6,02

Где b – ширина полки; t – толщина полки; I – момент инерции; x_0 – расстояние от центра тяжести до наружной грани полки; I_{xy} – центробежный момент инерции; i – радиус инерции

Теплофизические свойства некоторых марок стали

№	Марка стали	Темп-ра, К	Теплоемкость, Дж/(кг·К)	Теплопроводность, Вт/(м·К)	Плотность, кг/м ³
1	Ст.20 ГОСТ 1050–60	0	458	59	7 830
		27	461	58	
		127	504	53	
		327	585	48	
		527	691	42	
		727	703	34	
		927	673	27	
2	Ст.35 ГОСТ 1050–60	0	450	49	7 780
		27	452	48	
		127	504	45	
		327	562	43	
		527	670	40	
		727	644	34	
		927	564	30	
3	Ст.45 ГОСТ 1050-60	0	465	49	7 770
		27	469	48	
		127	506	47	
		327	521	41	
		527	660	37	
		727	616	32	
		927	577	23	
4	Ст.У8 ГОСТ 1435-54	0	460	51	7 760
		27	462	50	
		127	500	47	
		327	562	40	
		527	605	34	
		727	636	30	
		927	662	26	

ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Наименование понятия	Содержание понятия
1	2
Виды начала процесса горения	вспышка, возгорание, воспламенение, самовозгорание
Взрыв	это процесс освобождения большого количества энергии в ограниченном объёме за короткий промежуток времени (<i>характерный признак взрыва — мгновенный рост высокой температуры и высокого давления газов в месте взрыва</i>)
Внутренние пожары	происходят в закрытых «замкнутых» пространствах
Возгорание	возникновение горения под воздействием источника зажигания
Вспышка	это быстрое сгорание горючей смеси, не сопровождающееся образованием сжатых газов
Воспламенение	возгорание, сопровождающееся появлением пламени
Высшая теплота сгорания (Q_v)	это то количество теплоты, которое выделяется при полном сгорании вещества, включая теплоту конденсации водяных паров при охлаждении продуктов сгорания
Газообмен	это конвективные газовые потоки, которые образуются над зоной горения
Горение	это химический процесс соединения веществ с кислородом, сопровождающийся выделением тепла и света
Горючие (<i>сгораемые</i>) вещества	это вещества и материалы, способные самовозгораться, а также возгораться при воздействии источника зажигания и самостоятельно гореть после его удаления.
Динамика пожара	это процесс развития пожара во времени и пространстве, сопровождающийся воздействием его опасных факторов на окружающую среду
Зона пожара	это пространство, в котором происходит пожар и вокруг него
Зона горения	это часть пространства, в которой происходит подготовка горючих веществ к горению и их горение
Зона задымления	это часть пространства, примыкающая к зоне горения и заполненная дымовыми газами, концентрация которых создаёт угрозу жизни и здоровью людей
Зона теплового воздействия	это часть пространства, примыкающая к зоне горения, в котором тепловое воздействие приводит заметному изменению состояния материалов и конструкций, а также делает невозможным пребывание людей без теплозащиты
Интегральная модель пожара	это прогноз средних значений параметров состояния среды в помещении для любого момента развития внутреннего пожара
Интенсивностью газообмена	называется количество воздуха, притекающее в единицу времени к единице площади пожара

Продолжение таблицы

Наименование понятия	Содержание понятия
1	2
Интенсивность или плотность задымления	эти параметры характеризуются ухудшением видимости и степенью токсичности в зоне задымления
Испарение	это переход жидкости в пар
Зонная модель пожара	это прогноз размеров характерных пространственных зон, возникающих при внутреннем пожаре и средних значений параметров состояния среды в этих зонах для любого момента развития пожара
Легковоспламеняющиеся жидкости (ЛВЖ)	это горючие жидкости (ГЖ) с температурой вспышки не более 61 °С
Линейная скорость распространения пожара	это скорость распространения горения по поверхности горючего материала за единицу времени (она определяет площадь пожара и зависит от вида горючего, от начальной температуры, способности к воспламенению, интенсивности газообмена)
Массовой скоростью выгорания	это масса вещества или материала, выгоревшая в единицу времени VM (кг/с)
Микробиологическому самовозгоранию	склонны многие продукты растениеводства — сырое зерно, сено и др., в которых при определенной влажности и температуре интенсифицируется жизнедеятельность микроорганизмов и образуется паутинистый грибок (это вызывает повышение температуры веществ до критических величин, после которых происходит самоускорение экзотермических реакций)
Насыщенный пар	это пар, находящийся в динамическом равновесии с жидкостью
Негорючие вещества	это вещества и материалы, не способные к горению в воздухе
Низшая теплота сгорания (Q_n)	это то количество теплоты, которое выделяется при полном сгорании, без учёта теплоты конденсации водяного пара (теплоту конденсации водяных паров также называют скрытой теплотой парообразования –конденсации)
Низшая и высшая теплота сгорания связаны соотношением:	$Q_v = Q_n + k(W + 9H),$ где k – коэффициент, равный 25 кДж/кг (6 ккал/кг); W – количество воды в горючем веществе, % (по массе); H – количество водорода в горючем веществе, % (по массе).
Объемной скоростью выгорания	это объем жидкости, выгоревшей в единицу времени с единицы площади поверхности горения
«Огненный шар»	это крупномасштабное диффузионное горение паро-газо-воздушного облака, реализуемое при разгерметизации резервуара с перегретой горючей жидкостью или газом под давлением, а также со сжиженными газами

Продолжение таблицы

Наименование понятия	Содержание понятия
1	2
Опасным называется фактор пожара	воздействие которого приводит к травме, отравлению или гибели человека, а так же к материальному ущербу
1	2
Открытые пожары	это пожары, развивающиеся на открытом пространстве
ОФП	пламя, высокая температура, интенсивность теплового излучения, токсичные продукты горения, дым, снижение содержания кислорода в воздухе
Параметры пожара:	продолжительность, площадь, температура, теплота, линейная скорость распространения пожара, скорость выгорания горючих веществ, интенсивность газообмена, плотность задымления
Пламя	это видимая часть пространства (<i>пламенная зона</i>), внутри которой протекает процесс окисления (<i>горения</i>) и происходит тепловыделение, а также генерируются токсичные газообразные продукты горения и поглощается забираемый из окружающего пространства кислород
Площадь пожара	это площадь проекции зоны горения на горизонтальную или вертикальную плоскость
Пожарная нагрузка	это масса всех горючих веществ, приходящихся на 1 м ² площади пола помещения или площади, занимаемой этими материалами на открытой площадке: <u>постоянная</u> – горючие материалы строительных конструкций, технологическое оборудование и т.п.; <u>временная</u> – сырьё, готовая продукция, мебель (т.е. расходные материалы)
а) полная пожарная нагрузка	– это суммарное количество тепла, выделяемое в воздушное пространство здания, помещения, и т.д. после полного сгорания всех горючих твёрдых материалов, легковоспламеняющихся жидких веществ, газов
б) удельная пожарная нагрузка	это отношение полной нагрузки к площади здания, помещения и т.п.
Полевая модель пожара	это прогноз пространственно-временного распределения температур и скоростей газовой среды в помещении, концентраций компонентов среды, давлений и плотностей в любой точке помещения
Продолжительность пожара	это время с момента возникновения до полной ликвидации
Процесс дымообразования	это процесс образования дисперсной среды, ухудшающей видимость
Процесс самовоспламенения	это начало процесса горения, вызванное внешним источником тепла и нагреванием вещества без соприкосновения с открытым пламенем
Самовозгорание	процесс самонагрева и последующего горения некоторых веществ без воздействия открытого источника зажигания (<i>выделяют несколько видов самовозгорания</i>)

Продолжение таблицы

Наименование понятия	Содержание понятия
1	2
Скорость испарения	определяется количеством пара, образующегося в единицу времени на единице поверхности жидкости
Скорость выгорания горючих веществ и материалов	определяет интенсивность тепловыделения на пожаре, а, следовательно, температуру пожара, интенсивность его развития и другие параметры
Скрытая теплота сгорания газа	это теплота, которая выделяется при конденсации водяных паров, содержащихся в продуктах сгорания. Теоретически она может достигать 11 %
Температура воспламенения	наименьшая температура вещества, при которой в условиях специальных испытаний вещество выделяет горючие пары и газы с такой скоростью, что после их зажигания возникает устойчивое пламенное горение (<i>температура воспламенения всегда несколько выше температуры вспышки</i>)
Температура вспышки	самая низкая температура горючего вещества, при которой над его поверхностью образуются пары или газы, способные вспыхивать от источника зажигания, но скорость их образования ещё недостаточна для последующего горения
Температура пожара	это температура пламени для открытого пожара и температура дыма для внутреннего
Температура самовоспламенения	самая низкая температура горючего вещества, при которой происходит резкое увеличение скорости экзотермических реакций, заканчивающееся возникновением пламени
Тепловое самовозгорание	происходит при первоначальном внешнем нагреве вещества до определённой температуры
Теплота сгорания	это количество выделившейся теплоты при полном сгорании массовой (для твёрдых и жидких веществ) или объёмной (для газообразных) единицы вещества (Дж или кал)
Теплота пожара	это количество тепла, которое выделяется в зоне горения за единицу времени (кДж/с)
Требуемая интенсивность газообмена показывает	какое количество воздуха должно притекать в единицу времени к единице площади пожара для обеспечения полного сгорания материала.
Трудногорючие (<i>трудносгораемые</i>) вещества	это вещества и материалы, способные гореть в воздухе при воздействии источника зажигания, но не способные самостоятельно гореть после его удаления
Удельная теплота сгорания	это теплота сгорания, отнесённая к единице массы или объёма топлива
Удельная массовая скорость выгорания	это масса жидкой или твёрдой горючей технологической среды (пожарной нагрузки), сгорающей в единицу времени с единицы площади, $кг / (м^2 \cdot с)$
Фактическая интенсивность газообмена характеризует	фактический приток воздуха на пожаре
Химическое самовозгорание	является результатом взаимодействия веществ с кислородом воздуха, воды или между самими веществами (<i>к самовозгоранию предрасположены растительные масла, животные жиры и пропитанные ими тряпки, ветошь, вата – разогрев таких веществ происходит за счёт реакции окисления и полимеризации, которые могут начаться при обычных температурах 10–30 °С</i>)

Образец оформления титульного листа

МЧС РОССИИ
САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
ГОСУДАРСТВЕННОЙ ПРОТИВОПОЖАРНОЙ СЛУЖБЫ

Кафедра физико-технических основ обеспечения пожарной безопасности

Курсовой проект по дисциплине «Теплотехника»

Работу выполнил:

Вариант №

Санкт-Петербург – 2023

ЛИТЕРАТУРА

1. Кошмаров Ю.А. Прогнозирование опасных факторов пожара в помещении: учеб. пособие. М.: Академия ГПС МВД России, 2000. 118 с.
2. Пузач С.В. Методы расчёта тепломассообмена при пожаре в помещении и их применение при решении практических задач пожаровзрывобезопасности: монография. М.: Академия ГПС МЧС России, 2005. 336 с
3. Термогазодинамика пожаров в помещениях / Астапенко В.М. [и др.]. М.: Стройиздат, 1988. 418 с.
4. Кошмаров Ю.А., Рубцов В.В. Процессы нарастания опасных факторов пожара в производственных помещениях и расчёт критической продолжительности пожара. М.: МИПБ МВД России, 1999. 89 с.
5. Драйздел Д. Введение в динамику пожара. М.: Стройиздат, 1990. 420 с.
6. СИТИС СПН-1 Пожарная нагрузка. Справочник. Редакция 1 от 14 мая 2014. ООО «СИТИС», 2014.
7. ГОСТ 8239-89 Двутавры стальные горячекатаные. Сортамент. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200004409> (дата обращения: 21.03.2018). Доступ из информ.-правового портала «Гарант».
8. Технический регламент о требованиях пожарной безопасности: Федер. закон Рос. Федерации от 22 июля 2008 г. № 123-ФЗ (ред. от 29.07.2017). URL: <http://docs.cntd.ru/document/902111644> (дата обращения: 11.01.2018). Доступ из информ.-правового портала «Гарант».
9. Об утверждении методики определения расчётных величин пожарного риска на производственных объектах: приказ МЧС Рос. Федерации от 10 июля 2009 г. № 404. URL: <http://base.garant.ru/196118/> (дата обращения: 28.12.2017). Доступ из информ.-правового портала «Гарант».
10. Межгосударственный стандарт ГОСТ 30247.0-94 (ИСО 834-75). Конструкции строительные. Методы испытаний на огнестойкость. Общие

требования. URL: <http://files.stroyinf.ru/Data1/3/3141/> (дата обращения: 20.02.2018). Доступ из информ.-правового портала «Гарант».

11. ГОСТ Р 53295-2009. Средства огнезащиты для стальных конструкций. Общие требования. Метод определения огнезащитной эффективности». URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200071913> (дата обращения: 20.02.2018). Доступ из информ.-правового портала «Гарант».

12. Технониколь. Руководство по проектированию и устройству конструктивной огнезащиты строительных конструкций. М.: 2017. 108 с.

13. Грачёв, В.Ю. Введение в моделирование пожаров для расчета пожарного риска В.Ю. Грачёв. Екатеринбург: СИТИС, 2009. 120 с.

14. Кошмаров, Ю.А. Термодинамика и теплопередача в пожарном деле / Ю.А. Кошмаров, М.П. Башкирцев. М.: ВИПТШ МВД СССР, 1987. 444 с.

15. Методические рекомендации по использованию программы CFAST. Екатеринбург: СИТИС, 2009. 58 с.

16. Применение полевого метода математического моделирования пожаров в помещениях: метод. рекомендации. М.: ВНИИПО МЧС России, 2003. 35 с.

17. Пузач, С.В. Математическое моделирование газодинамики и теплообмена при решении задач пожаровзрывобезопасности / С.В. Пузач. М.: Академия ГПС МЧС России, 2002. 150 с.

18. Пузач, С.В. Методы расчёта тепломассообмена при пожаре в помещении и их применение при решении практических задач пожаровзрывобезопасности / С.В. Пузач. М.: Академия ГПС МЧС России, 2005. 336 с.

19. Расчёт распространения ОФП. Техническое руководство СИТИС: ВИМ 1.60. Екатеринбург: СИТИС, 2011. 64 с.

20. Рекомендации по использованию программы FDS с применением программ PyroSim 2010-2 и SmokeView. Екатеринбург: СИТИС, 2011. 88 с.

ИНФОРМАЦИОННАЯ СПРАВКА

Старейшее учебное заведение пожарно-технического профиля России образовано 18 октября 1906 года, когда на основании решения Городской Думы Санкт-Петербурга были открыты Курсы пожарных техников. Наряду с подготовкой пожарных специалистов, учебному заведению вменялось в обязанность заниматься обобщением и систематизацией пожарно-технических знаний, оформлением их в отдельные учебные дисциплины. Именно здесь были созданы первые отечественные учебники, по которым обучались все пожарные специалисты страны.

В последующем учебное заведение преобразовывалось и меняло своё название. 25 апреля 2022 года в соответствии с Указом Президента Российской Федерации В.В. Путина Санкт-Петербургскому университету ГПС МЧС России присвоено почётное наименование «имени Героя Российской Федерации генерала армии Е. Н. Зиничева».

Учебным заведением за вековую историю подготовлено несколько десятков тысяч специалистов, которых всегда отличали не только высокие профессиональные знания, но и беспредельная преданность профессии пожарного и верность присяге. Свидетельство тому – целый ряд сотрудников и выпускников ВУЗа, награждённых высшими наградами страны, среди них: кавалеры

Георгиевского креста, четыре Героя Советского Союза и Герой России. Далеко не случаен тот факт, что среди руководящего состава пожарной охраны страны всегда было много выпускников учебного заведения.

Сегодня федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский университет Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий имени Героя Российской Федерации генерала армии Е. Н. Зиничева» – современный научно-образовательный комплекс, интегрированный в российское и мировое научно-образовательное пространство. Учебный процесс осуществляется по 891 дисциплине на 28 кафедрах. Университет осуществляет подготовку по разным формам обучения: очной, заочной и заочной с применением дистанционных технологий по программам среднего, высшего образования, а также подготовку специалистов высшей квалификации, переподготовку и повышение квалификации специалистов МЧС России.

Начальник университета – генерал-лейтенант внутренней службы доктор технических наук, доцент Гавкалюк Богдан Васильевич.

Подготовка реализуется по 21 образовательной программе высшего образования, что является наибольшим количеством реализуемых программ среди образовательных организаций высшего образования МЧС России, и 83 программам дополнительного профессионального образования и профессионального обучения.

По программам специалитета в университете можно пройти обучение по таким направлениям подготовки, как: «Пожарная безопасность», «Горное дело», «Психология служебной деятельности», «Экономическая безопасность», «Правовое обеспечение национальной безопасности», «Судебная экспертиза». По программам бакалавриата – «Техносферная безопасность», «Системный анализ и управление», «Психология», «Управление персоналом», «Государственное и муниципальное управление», «Юриспруденция». По программам магистратуры – «Техносферная безопасность», «Системный анализ и управление», «Государственное и муниципальное управление», «Юриспруденция».

Широта научных интересов, высокий профессионализм, большой опыт научно-педагогической деятельности, владение современными методами научных исследований позволяют коллективу университета преумножать научный и научно-педагогический потенциал вуза, обеспечивать непрерывность и преемственность образовательного процесса.

Укомплектованность научно-педагогическим составом, имеющим учёные степени и звания, составляет более 70 %, что позволяет университету занимать лидирующие позиции среди учебных заведений Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий. Сегодня в университете свои знания и огромный опыт передают: 56 докторов наук, 267 кандидатов наук, 46 профессоров, 150 доцентов.

В составе университета:

- 28 кафедр;
- Институт безопасности жизнедеятельности;
- Институт заочного и дистанционного обучения;
- Институт нравственно-патриотического и эстетического развития;
- Институт профессиональной подготовки;
- Институт развития;
- Научно-исследовательский институт перспективных исследований и инновационных технологий в области безопасности жизнедеятельности;
- Дальневосточная пожарно-спасательная академия – филиал университета (ДВПСА);

– пять факультетов: факультет инженерно-технический, факультет экономики и права, факультет подготовки кадров высшей квалификации, факультет пожарной безопасности (подразделение ДВПСА), факультет дополнительного профессионального образования (подразделение ДВПСА).

Институт безопасности жизнедеятельности осуществляет образовательную деятельность по программам высшего образования по договорам об оказании платных образовательных услуг.

Приоритетным направлением в работе Института заочного и дистанционного обучения является подготовка кадров начальствующего состава для замещения соответствующих должностей в подразделениях МЧС России. Нарастающая сложность и комплексность современных задач заметно повышают требования к организации образовательного процесса.

Сегодня университет реализует программы обучения с применением технологий дистанционного обучения.

Институт развития реализует дополнительные профессиональные программы по повышению квалификации и профессиональной переподготовке в рамках выполнения государственного заказа МЧС России для совершенствования и развития системы кадрового обеспечения, а также на договорной основе.

Научно-исследовательский институт перспективных исследований и инновационных технологий в области безопасности жизнедеятельности осуществляет: реализацию государственной научно-технической политики, изучение и решение научно-технических проблем, информационного и методического обеспечения в области пожарной безопасности. Основные направления деятельности научно-исследовательского института: организационное и научно-методическое руководство судебно-экспертными учреждениями федеральной противопожарной службы МЧС России; сертификация продукции в области пожарной безопасности; проведение испытаний и разработка научно-технической продукции в области пожарной безопасности; проведение расчётов пожарного риска и расчётов динамики пожара с использованием компьютерных программ.

Институт активно участвует в разработке новых и совершенствовании существующих инструментальных методов и технических средств исследования и экспертизы пожаров, производстве судебных пожарно-технических экспертиз и исследованиях в области экспертизы пожаров, выполнении поисковых научно-исследовательских работ прикладного характера, выполнении поисковых научно-исследовательских работ по обеспечению безопасности в Арктическом регионе и проведении сертификационных испытаний, апробировании методик по стандартам ISO, EN и резолюциям IMO.

Университет имеет представительства в городах: Выборг (Ленинградская область), Вытегра, Горячий Ключ (Краснодарский край), Мурманск, Петрозаводск, Пятигорск, Севастополь, Стрежевой, Сыктывкар, Тюмень, Уфа; представительства университета за рубежом: г. Алма-Ата (Республика Казахстан), г. Баку (Азербайджанская Республика), г. Ниш (Сербия).

На базе Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России 1 июля 2013 года открыт Кадетский пожарно-спасательный корпус. Он осуществляет подготовку кадетов по общеобразовательным программам среднего общего образования с учётом дополнительных образовательных программ. Основные особенности деятельности корпуса – интеллектуальное, культурное, физическое и духовно-нравственное развитие кадет, их адаптация к жизни в обществе, создание основы для подготовки несовершеннолетних граждан к служению Отечеству на поприще государственной гражданской, военной, правоохранительной и муниципальной службы.

Общее количество обучающихся в университете по всем специальностям, направлениям подготовки, среднему общему образованию составляет более 7 000 человек. Ежегодный выпуск составляет более 1 100 специалистов.

В университете действует два диссертационных совета по защите диссертаций на соискание учёной степени доктора и кандидата наук по техническим и экономическим наукам.

Университет издаёт 7 научных журналов, публикуются материалы ряда международных и всероссийских научных мероприятий, сборники научных трудов профессорско-преподавательского состава университета.

Издания университета соответствуют требованиям законодательства Российской Федерации и включены в электронную базу Научной электронной библиотеки для определения Российского индекса научного цитирования, а также имеют международный индекс (ISSN). Научно-аналитический журнал «Проблемы управления рисками в техносфере» и электронный «Научно-аналитический журнал

«Вестник Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России» включены в утверждённый решением Высшей аттестационной комиссии «Перечень рецензируемых научных журналов, в которых публикуются основные научные

результаты диссертаций на соискание учёной степени кандидата наук, на соискание учёной степени доктора наук».

Ежегодно университет проводит научно-практические конференции различного уровня: Всероссийскую научно-практическую конференцию «Сервис безопасности в России: опыт, проблемы и перспективы», Международную

научно-практическую конференцию «Подготовка кадров в системе предупреждения и ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций».

Университет ежегодно принимает участие в выставках, организованных МЧС России и другими ведомствами и организациями. Традиционно большим интересом пользуется выставочная экспозиция университета на Международном салоне средств обеспечения безопасности «Комплексная безопасность», Петербургском международном экономическом форуме, Международном форуме «Арктика: настоящее и будущее».

Международная деятельность вуза направлена на всестороннюю интеграцию университета в международное образовательное пространство. Университет, осуществляя образовательную деятельность, обладает широкой локализацией на территории Российской Федерации, государств-участников Содружества Независимых Государств и других стран.

Большой интерес к обучению в университете проявляется со стороны иностранных граждан. В университете обучаются иностранные курсанты из числа сотрудников Государственной противопожарной службы МЧС Кыргызской Республики и Комитета по чрезвычайным ситуациям МВД Республики Казахстан. Только в период с 2016 по 2021 год в университете прошли обучение по программам дополнительного профессионального образования 712 иностранных граждан, завершили обучение по программам высшего образования 468 иностранных граждан.

В соответствии с двусторонними соглашениями университет осуществляет обучение по программам повышения квалификации. Регулярно проходят обучение в университете специалисты Российско-сербского гуманитарного центра, Российско-армянского центра гуманитарного реагирования, Международной организации гражданской обороны.

В университете имеются возможности для повышения уровня знания английского языка. Организовано обучение по программе дополнительного профессионального образования «Переводчик в сфере профессиональной коммуникации» студентов, курсантов, адъюнктов и сотрудников.

В университете большое внимание уделяется спорту. Команды, состоящие из преподавателей, курсантов и слушателей – постоянные участники различных спортивных турниров, проводимых как в России, так и за рубежом. Слушатели и курсанты университета являются членами сборных команд МЧС России по различным видам спорта.

Деятельность команды университета по пожарно-спасательному спорту (ПСС) включает в себя участие в чемпионатах России среди ВУЗов (зимний и летний), в зональных соревнованиях и чемпионате России, а также проведение

бесед и консультаций, оказание практической помощи юным пожарным, кадетам и спасателям при проведении тренировок по ПСС.

В университете создан спортивный клуб «Невские львы», в состав которого входят команды по 18 видам спорта. В составе сборных команд университета – чемпионы и призёры мировых первенств и международных турниров.

Курсанты и слушатели имеют прекрасные возможности для повышения своего культурного уровня, развития творческих способностей в созданном в университете Институте нравственно-патриотического и эстетического развития. Творческий коллектив университета принимает активное участие в ведомственных, городских и университетских мероприятиях, направленных на эстетическое и патриотическое воспитание молодёжи, а также занимает призовые места в конкурсах, проводимых на уровне университета, города и МЧС России. На каждом курсе организована работа по созданию и развитию творческих объединений по различным направлениям: студия вокала, студия танцев, клуб весёлых и находчивых. Для курсантов и студентов действует студия ораторского искусства, команда технического обеспечения, духовой оркестр. К 75-летию со Дня Победы в Великой Отечественной войне и 30-летию МЧС России на территории учебного заведения был открыт музей истории Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России, в котором обучающиеся, сотрудники, гости университета могут познакомиться со всеми этапами становления учебного заведения – от курсов пожарных техников до высшего учебного заведения.

В федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский университет Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий имени Героя Российской Федерации генерала армии Е. Н. Зиничева» созданы все условия для подготовки высококвалифицированных специалистов МЧС России.

Пермяков Алексей Александрович
кандидат педагогических наук, доцент

Кузьмин Анатолий Алексеевич
кандидат педагогических наук, доцент

Романов Николай Николаевич
кандидат технических наук, доцент

ТЕРМОГАЗОДИНАМИЧЕСКИЙ РЕЖИМ ПОЖАРА В ПОМЕЩЕНИИ. КУРСОВОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ

Учебное пособие

Печатается в авторской редакции
Службное издание

Подписано в печать 15.04.2024 г.
Печать цифровая

Заказ № 5
Объем 8,5 п. л.

Формат 60×84 ^{1/16}
Тираж 500 экз.

Отпечатано в Санкт-Петербургском университете ГПС МЧС России
196105, Санкт-Петербург, Московский пр., 149