

**МИНИСТЕРСТВО РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ПО ДЕЛАМ ГРАЖДАНСКОЙ ОБОРОНЫ, ЧРЕЗВЫЧАЙНЫМ  
СИТУАЦИЯМ И ЛИКВИДАЦИИ СТИХИЙНЫХ БЕДСТВИЙ  
САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ГОСУДАРСТВЕННОЙ ПРОТИВОПОЖАРНОЙ СЛУЖБЫ**

**Д.Ф. Кожевин, Е.Г. Коробейникова**

**Физико-химические основы развития  
и тушения пожаров**

**УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ**

**КУРСОВОЙ РАБОТЫ**

**Расчет опасных факторов пожара при горении горючих жидко-  
стей на промышленных объектах**

**САНКТ-ПЕТЕРБУРГ**

**2020**

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

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ГОСУДАРСТВЕННОЙ ПРОТИВОПОЖАРНОЙ СЛУЖБЫ

## **Физико-химические основы развития и тушения пожаров**

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ  
КУРСОВОЙ РАБОТЫ

Расчет опасных факторов пожара при горении горючих жидкостей на  
промышленных объектах

по специальностям

40.05.03 – «Судебная экспертиза»

21.05.04 «Горное дело»

по направлению подготовки

20.03.01 «Техносферная безопасность»

профиль «Пожарно-техническая экспертиза»

Санкт – Петербург

2020

Д.Ф. Кожевин, Е.Г.Коробейникова - Расчет опасных факторов пожара при горении горючих жидкостей на промышленных объектах. - Учебное пособие по выполнению курсовой работы для курсантов и слушателей/. СПб.: Санкт-Петербургский Университет ГПС МЧС России, 2020. –194 с.

Методические рекомендации предназначены для курсантов и слушателей очной и заочной форм обучения высших учебных заведений пожарно-технического профиля по специальностям 40.05.03 - «Судебная экспертиза», 21.05.04 «Горное дело» и по направлению подготовки 20.03.01 «Техносферная безопасность» профиль «Пожарно-техническая экспертиза». Рекомендации содержат введение, пояснительную записку, состоящую из 4-х глав, приложения, включающие задания для выполнения курсового проекта и список рекомендуемой литературы.

© Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, 2020

## Оглавление

1	ВВЕДЕНИЕ .....	7
2	Требования к оформлению курсовой работы .....	10
2.1	Общие требования .....	10
2.2	Иллюстрации .....	14
2.3	Таблицы .....	15
2.4	Формулы и уравнения .....	17
2.5	Ссылки .....	18
3	Определение показателей пожарной опасности.....	19
3.1	Температура вспышки.....	29
3.1.1	Расчет температуры вспышки .....	29
3.1.2	Расчет температуры вспышки для некоторых классов соединений .. .....	33
3.1.3	Расчет температуры вспышки по формуле Блинова.....	34
3.2	Расчет температуры воспламенения.....	39
3.2.1	Расчет температуры воспламенения жидкости .....	39
3.2.2	Расчет температуры воспламенения алифатических спиртов и сложных эфиров.....	41
3.2.3	Расчет температуры воспламенения по формуле Блинова .....	42
3.3	Температура самовоспламенения .....	44
3.4	Концентрационные пределы распространения пламени.....	52
3.4.1	Расчет КПР по аппроксимационной формуле .....	53
3.4.2	Расчет КПР по известной теплоте образования .....	55
3.4.3	Расчет концентрационных пределов распространения пламени для смесей газов .....	56
3.5	Температурные пределы распространения пламени .....	57
3.5.1	Расчет температурных пределов распространения пламени по известной зависимости давления насыщенного пара от температуры ..	57

3.5.2	Расчет температурных пределов распространения пламени для веществ, состоящих из атомов С, Н, О, N .....	58
3.6	Нормальная скорость распространения пламени.....	61
3.7	Критический диаметр огнегасящего канала и безопасного экспериментального максимального зазора .....	64
3.8	Минимальная энергия зажигания .....	68
3.8.1	Способ №1 .....	69
3.8.2	Способ №2 .....	69
3.8.3	Способ №3 .....	70
3.9	Способность гореть и взрываться при взаимодействии с водой, кислородом и другими веществами .....	73
3.10	Минимальная флегматизирующая концентрация флегматизатора и минимальное взрывоопасное содержание кислорода.....	74
3.10.1	Минимальная флегматизирующая концентрация газовых средств пожаротушения $C_{МФК}$ , % (об) .....	78
3.10.2	Концентрация горючего в смеси (в %) соответствующей по составу точке флегматизации .....	81
3.11	Минимальное взрывоопасное содержание кислорода .....	82
3.11.1	Расчет минимальной огнетушащей концентрации газовых средств пожаротушения ( $C_{МОК}$ , %(об)).....	84
3.12	Максимальное давление взрыва.....	84
3.13	Выводы и рекомендации.....	86
4	Расчет опасных факторов при реализации аварийной ситуации ..	93
4.1	Расчет опасных факторов при аварийной ситуации технологической площадке.....	93
4.1.1	Определение массы жидкости поступившей в окружающее пространство при аварии .....	96
4.1.2	Максимальные размеры взрывоопасных зон.....	99

4.1.3	Определение параметров волны давления при сгорании газо-, паро- или пылевоздушного облака .....	100
4.1.4	Интенсивность теплового излучения пожара пролива .....	121
4.2	Расчет опасных факторов при пожаре в здании .....	133
4.2.1	Интегральный метод.....	135
4.2.2	Зонный метод .....	140
4.3	Расчет избыточного давления взрыва при пожаре в здании .....	168
5	Приложение 1 .....	182
6	Приложение 2 .....	186
7	Приложение 3 .....	191
8	Приложение 4 .....	192
9	Список литературы .....	193

## 1 ВВЕДЕНИЕ

В соответствии с учебным планом Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России по дисциплине «Физико-химические основы развития и тушения пожаров» предусмотрено выполнение курсовой работы. Работа выполняется с целью систематизации, закрепления и углубления знаний, полученных на предыдущих этапах обучения. При этом курсанты и слушатели приобретают навыки самостоятельной творческой работы, анализа и умения грамотно, стройно и логически обоснованно излагать свои мысли и оформлять результаты работы при решении задач по анализу пожарной опасности веществ и материалов, обращающихся в производственных процессах производств.

Курсовая работа является итоговой по курсу «Физико-химические основы развития и тушения пожара». Выполняя ее, обучаемый должен показать навыки инженерных расчетов по оценке пожарной опасности веществ, их анализу, а также по выбору необходимых огнетушащих веществ.

Полученные навыки при выполнении курсовой работы необходимы для практической деятельности в органах Государственной противопожарной службы МЧС России.

В настоящем пособии изложены методические рекомендации по выполнению основных разделов курсовой работы, требования к его оформлению и представлению материалов к защите.

Курсовая работа предназначена для отработки навыков расчетов по определению пожарной опасности производственно-административного здания, расположенного на территории производственного объекта. Кроме здания на территории расположен резервуар с пожароопасной жидкостью.

Схема расположения здания и сооружения на объекте в 2D и 3D приведена на рисунках 1 и 2.



Рисунок 1 - Схема расположения зданий и сооружений на территории объекта (2D)

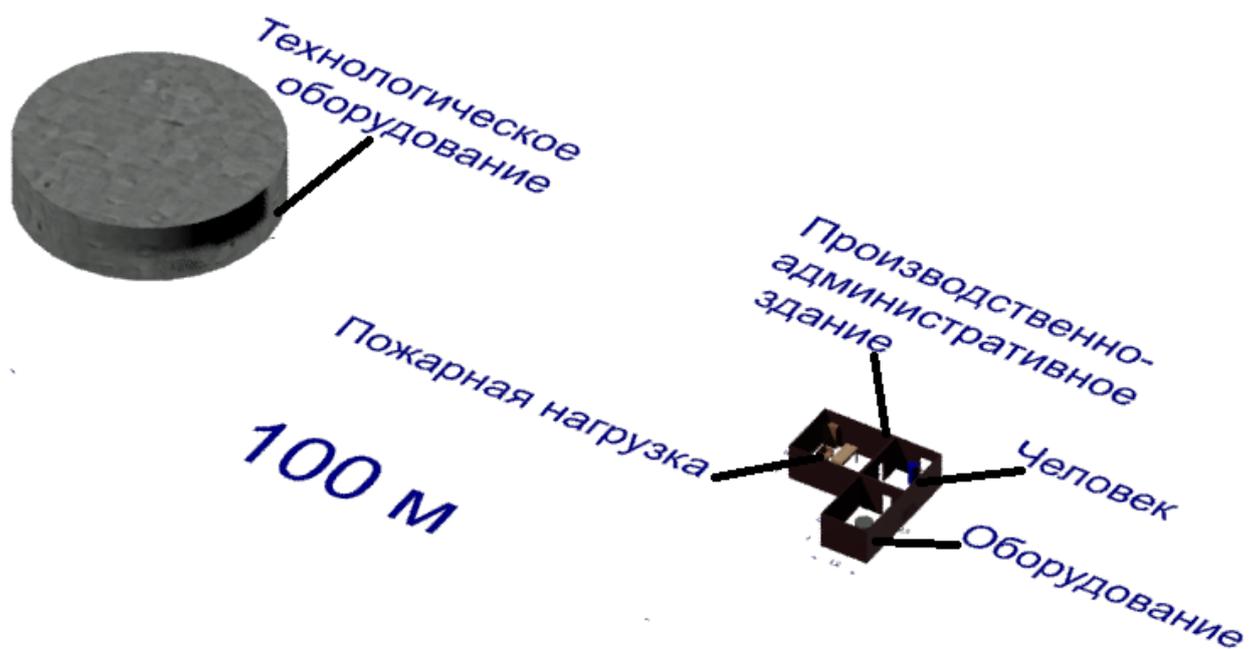


Рисунок 2 - Схема расположения зданий и сооружений на территории объекта (3D)

Целью работы является проведение анализа пожарной опасности объекта, включающее в себя:

- определение показателей пожарной опасности жидкости обращающейся на объекте;

- определение величины избыточного давления и взрыва в помещении;

- определение времени блокирования путей эвакуации при пожаре в помещении здания;

- количественная оценка опасных факторов пожара при разгерметизации наружного оборудования.

Пособие предназначено для курсантов и слушателей очной формы обучения по специальности, 20.05.01 «Пожарная безопасность», 40.05.03 -«Судебная экспертиза», 21.05.04 «Горное дело».

## **2 ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ КУРСОВОЙ РАБОТЫ**

Оформление курсовой работы необходимо выполнять в соответствии с ГОСТ 7.32-2017, основные требования к оформлению с примерами, рассмотрены далее. Структура курсовой работы должна соответствовать структуре методического пособия, только вместо главы 1 должны быть приведены исходные данные для выполнения курсовой работы.

### **2.1 Общие требования**

Страницы текста включенные в курсовую работу иллюстрации и таблицы должны соответствовать формату А4 по ГОСТ 9327.

Допускается применение формата А3 при наличии большого количества таблиц и иллюстраций данного формата.

Курсовая работа должна быть выполнена любым печатным способом на одной стороне листа белой бумаги формата А4 через полтора интервала.

Цвет шрифта должен быть черным, размер шрифта 14 пт. Рекомендуемый тип шрифта для основного текста отчета- Times New Roman. Полужирный шрифт применяют только для заголовков разделов и подразделов, заголовков структурных элементов. Для акцентирования внимания может применяться выделение текста с помощью шрифта иного начертания, чем шрифт основного текста, но того же кегля и гарнитуры.

Текст курсовой работы следует печатать, соблюдая следующие размеры полей: левое - 30 мм, правое - 15 мм, верхнее и нижнее – 20 мм. Абзацный отступ должен быть одинаковым по всему тексту отчета и равен 1,25 см.

Наименования разделов курсовой работы служат заголовками структурных элементов курсовой работы.

Заголовки структурных элементов следует располагать в середине строки без точки в конце, прописными буквами, не подчеркивая. Каждый структурный элемент и каждый раздел основной части курсовой работы начинают с новой страницы.

Заголовки разделов и подразделов следует начинать с абзацного отступа и размещать после порядкового номера, печатать с прописной буквы, полужирным шрифтом, не подчеркивать, без точки в конце. Пункты и подпункты могут иметь только порядковый номер без заголовка, начинающийся с абзацного отступа.

Если заголовок включает несколько предложений, их разделяют точками. Переносы слов в заголовках не допускаются.

Страницы курсовой работы следует нумеровать арабскими цифрами, соблюдая сквозную нумерацию по всему тексту. Номер страницы проставляется в центре нижней части страницы без точки.

Титульный лист включают в общую нумерацию страниц курсовой работы. Номер страницы на титульном листе не проставляют.

Иллюстрации и таблицы, расположенные на отдельных листах, включают в общую нумерацию страниц курсовой работы.

Иллюстрации и таблицы на листе формата А3 учитывают как одну страницу.

Разделы должны иметь порядковые номера в пределах всей курсовой работы, обозначенные арабскими цифрами без точки и расположенные с абзацного отступа. Подразделы должны иметь нумерацию в пределах каждого раздела. Номер подраздела состоит из номеров раздела и подраздела, разделенных точкой. В конце номера подраздела

точка не ставится. Разделы, как и подразделы, могут состоять из одного или нескольких пунктов.

Если отчет имеет подразделы, то нумерация пунктов должна быть в пределах подраздела и номер пункта должен состоять из номеров раздела, подраздела и пункта, разделенных точками.

**Пример 1.1** Приведен фрагмент нумерации раздела, подраздела и пунктов курсовой работы

2 Расчет опасных факторов при реализации аварийной ситуации

2.1 Расчет опасных факторов на технологической площадке

2.1.1 Максимальные размеры взрывоопасных зон

Если раздел или подраздел состоит из одного пункта, то пункт не нумеруется.

Пункты при необходимости могут быть разбиты на подпункты, которые должны иметь порядковую нумерацию в пределах каждого пункта: 4.2.1.1, 4.2.1.2, 4.2.1.3 и т.д.

Внутри пунктов или подпунктов могут быть приведены перечисления. Перед каждым элементом перечисления следует ставить тире. При необходимости ссылки в тексте на один из элементов перечисления вместо тире ставят строчные буквы русского алфавита со скобкой, начиная с буквы "а" (за исключением букв ё, з, й, о, ч, ъ, ы, ь). Простые перечисления отделяются запятой, сложные - точкой с запятой.

При наличии конкретного числа перечислений допускается перед каждым элементом перечисления ставить арабские цифры, после которых ставится скобка.

Перечисления приводятся с абзацного отступа в столбик.

**Пример 1.2**

В соответствии с Методикой (приложение II, п.6) количество поступивших в окружающее пространство горючих веществ, которые мо-

гут образовать взрывоопасные газопаровоздушные смеси или проливы горючих сжиженных газов, легко воспламеняющихся и горючих жидкостей на подстилающей поверхности, определяется, исходя из следующих предпосылок:

- происходит расчетная авария одного из резервуаров (аппаратов) или трубопровода;

- все содержимое резервуара (аппарата, трубопровода) или часть продукта (при соответствующем обосновании) поступает в окружающее пространство. При этом в случае наличия на объекте нескольких аппаратов (резервуаров) расчет следует проводить для каждого резервуара (аппарата);

### ***Пример 1.3***

В соответствии с Методикой (приложение II, п.6) количество поступивших в окружающее пространство горючих веществ, которые могут образовать взрывоопасные газопаровоздушные смеси или проливы горючих сжиженных газов, легко воспламеняющихся и горючих жидкостей на подстилающей поверхности, определяется, исходя из следующих предпосылок:

- а) происходит расчетная авария одного из резервуаров (аппаратов) или трубопровода;

- б) все содержимое резервуара (аппарата, трубопровода) или часть продукта (при соответствующем обосновании) поступает в окружающее пространство. При этом в случае наличия на объекте нескольких аппаратов (резервуаров) расчет следует проводить для каждого резервуара (аппарата);

### ***Пример 1.4***

В соответствии с Методикой (приложение II, п.6) количество поступивших в окружающее пространство горючих веществ, которые мо-

гут образовать взрывоопасные газопаровоздушные смеси или проливы горючих сжиженных газов, легковоспламеняющихся и горючих жидкостей на подстилающей поверхности, определяется, исходя из следующих предпосылок:

1) происходит расчетная авария одного из резервуаров (аппаратов) или трубопровода;

2) все содержимое резервуара (аппарата, трубопровода) или часть продукта (при соответствующем обосновании) поступает в окружающее пространство. При этом в случае наличия на объекте нескольких аппаратов (резервуаров) расчет следует проводить для каждого резервуара (аппарата);

## **2.2 Иллюстрации**

Иллюстрации (чертежи, графики, схемы, компьютерные распечатки, диаграммы, фотоснимки) следует располагать в курсовой работе непосредственно после текста, где они упоминаются впервые, или на следующей странице (по возможности ближе к соответствующим частям текста отчета). На все иллюстрации в отчете должны быть даны ссылки. При ссылке необходимо писать слово "рисунок" и его номер, например: "в соответствии с рисунком 2" и т.д.

Иллюстрации, за исключением иллюстраций, приведенных в приложениях, следует нумеровать арабскими цифрами сквозной нумерацией. Если рисунок один, то он обозначается: Рисунок 1.

### ***Пример 1.5*** - Рисунок 1 - Схема прибора

Допускается нумеровать иллюстрации в пределах раздела курсовой работы. В этом случае номер иллюстрации состоит из номера раздела и порядкового номера иллюстрации, разделенных точкой: Рисунок 2.1.

Иллюстрации при необходимости могут иметь наименование и пояснительные данные (подрисовочный текст).

Слово "Рисунок", его номер и через тире наименование помещают после пояснительных данных и располагают в центре под рисунком без точки в конце.

***Пример 1.6*** - Рисунок 2 - Оформление таблицы

Если наименование рисунка состоит из нескольких строк, то его следует записывать через один межстрочный интервал. Наименование рисунка приводят с прописной буквы без точки в конце. Перенос слов в наименовании графического материала не допускается.

### **2.3 Таблицы**

Цифровой материал должен оформляться в виде таблиц. Таблицы применяют для наглядности и удобства сравнения показателей.

Таблицу следует располагать непосредственно после текста, в котором она упоминается впервые, или на следующей странице.

На все таблицы в отчете должны быть ссылки. При ссылке следует печатать слово "таблица" с указанием ее номера.

Наименование таблицы, при ее наличии, должно отражать ее содержание, быть точным, кратким. Наименование следует помещать над таблицей слева, без абзацного отступа в следующем формате: Таблица  
Номер таблицы – Наименование таблицы. Наименование таблицы приводят с прописной буквы без точки в конце.

Если наименование таблицы занимает две строки и более, то его следует записывать через один межстрочный интервал.

Таблицу с большим количеством строк допускается переносить на другую страницу. При переносе части таблицы на другую страницу слово "Таблица", ее номер и наименование указывают один раз слева над первой частью таблицы, а над другими частями также слева пишут сло-



Горизонтальные и вертикальные линии, разграничивающие строки таблицы, допускается не проводить, если их отсутствие не затрудняет пользование таблицей.

Текст, повторяющийся в строках одной и той же графы и состоящий из одиночных слов, заменяют кавычками.

Ставить кавычки вместо повторяющихся цифр, буквенно-цифровых обозначений, знаков и символов не допускается.

Если текст повторяется, то при первом повторении его заменяют словами "то же", а далее кавычками.

В таблице допускается применять размер шрифта меньше, чем в тексте отчета.

## **2.4 Формулы и уравнения**

Уравнения и формулы следует выделять из текста в отдельную строку. Выше и ниже каждой формулы или уравнения должно быть оставлено не менее одной свободной строки. Если уравнение не умещается в одну строку, оно должно быть перенесено после знака равенства (=) или после знаков плюс (+), минус (-), умножения (x), деления (:) или других математических знаков. На новой строке знак повторяется. При переносе формулы на знаке, символизирующем операцию умножения, применяют знак "X".

Пояснение значений символов и числовых коэффициентов следует приводить непосредственно под формулой в той же последовательности, в которой они представлены в формуле. Значение каждого символа и числового коэффициента необходимо приводить с новой строки. Первую строку пояснения начинают со слова "где" без двоеточия с абзаца.

Формулы в курсовой работе следует располагать посередине строки и обозначать порядковой нумерацией в пределах всей работы

арабскими цифрами в круглых скобках в крайнем правом положении на строке. Одну формулу обозначают (1).

Ссылки в отчете на порядковые номера формул приводятся в скобках: в формуле (1).

Допускается нумерация формул в пределах раздела. В этом случае номер формулы состоит из номера раздела и порядкового номера формулы, разделенных точкой: (3.1).

## **2.5 Ссылки**

В курсовой работе рекомендуется приводить ссылки на использованные источники. При нумерации ссылок на документы, использованные при составлении отчета, приводится сплошная нумерация для всего текста отчета в целом или для отдельных разделов. Порядковый номер ссылки (отсылки) приводят арабскими цифрами в квадратных скобках в конце текста ссылки. Порядковый номер библиографического описания источника в списке использованных источников соответствует номеру ссылки.

Ссылаться следует на документ в целом или на его разделы и приложения.

При ссылках на стандарты и технические условия указывают их обозначение, при этом допускается не указывать год их утверждения при условии полного описания стандарта и технических условий в списке использованных источников в соответствии с ГОСТ 7.1.

### ***Пример 1.7***

1 приведено в работах [1]-[4].

2 по ГОСТ 29029.

3 в работе [9], раздел 5.

### 3 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПОЖАРНОЙ ОПАСНОСТИ

В нашей стране принята система оценки пожарной опасности веществ и материалов, регламентированная ГОСТ 12.1.044-89\*. «Пожаровзрывоопасность веществ и материалов Номенклатура показателей и методы их определения». Этот ГОСТ согласован с международными стандартами. В стандарте описаны основные показатели, которые определяются при общей оценке пожаровзрывоопасности вещества, указаны области применения каждого показателя и рекомендуемые методы его определения. Там же сформулированы основные условия пожарной безопасности при проектировании и эксплуатации объектов народного хозяйства.

Для оценки пожаровзрывоопасности все вещества и материалы по агрегатному состоянию подразделяют на 4 группы: газы, жидкости и твердые и пыли.

В соответствии с [1] **жидкости** – это вещества, давление насыщенных паров которых при стандартных условиях меньше 101,3 кПа. К жидкостям относят также твердые плавящиеся вещества, температура плавления или каплепадения которых ниже 50 °С;

Для полной оценки пожаровзрывоопасности вещества необходимо знать его физико-химические свойства, а также поведение вещества при его производстве, применении, хранении и транспортировке. Особенно важно учитывать это при контакте исследуемого вещества с активными веществами, при длительном нагреве, облучении и других внешних воздействиях, в результате которых с течением времени могут измениться его физико-химические свойства. После этого для вещества определяются показатели пожаровзрывоопасности.

В соответствии с [1] пожаровзрывоопасность веществ и материалов определяется показателями, выбор которых зависит от агрегатного состояния вещества (материала) и условий его применения. Показатели пожарной опасности жидкостей приведены в таблицах 1, 2 и 3.

Таблица 1 - Показатели, характеризующие вещество (материал) как обладателя определенных индивидуальных пожаро- и взрывоопасных свойств (первая группа)

Показатель пожарной опасности, единицы измерения	Обозначение	Агрегатное состояние	Определение
Общие показатели пожарной опасности			
Группа горючести		г, ж, тв, пыли	Горючестью называется способность вещества или материала к распространению горения или тления
Температура самовоспламенения, 0С	t <sub>св</sub>	г, ж, тв, пыли	Самая низкая температура вещества, при которой в условиях специальных испытаний происходит резкое увеличение скорости экзотермических реакций, заканчивающихся пламенным горением
Теплота сгорания,	Q <sub>н</sub>	г, ж, тв,	Количество тепла, выде-

Показатель пожарной опасности, единицы измерения	Обозначение	Агрегатное состояние	Определение
МДж/кг		пыли	лившееся при полном сгорании единицы массы материала в среде кислорода
Индивидуальные показатели пожарной опасности			
	жидкости		
Температура вспышки, °С	твсп	ж	Самая низкая температура горючего вещества, при которой в условиях специальных испытаний над его поверхностью образуются пары или газы, способные вспыхивать от источника зажигания, но скорость их образования еще недостаточна для возникновения устойчивого горения
Температурные пределы распространения пламени, °С	ТПР		Температуры вещества, при которых его насыщенные пары образуют в конкретной окислительной среде концентрации, равные соответственно
Нижний предел	НТПР tn	ж	нижнему (нижний температурный предел) и верх-
Верхний предел	ВТПР		

Показатель пожарной опасности, единицы измерения	Обозначение	Агрегатное состояние	Определение
	тв		нему (верхний температурный предел) концентрационным пределам распространения пламени
<b>Групповые показатели пожарной опасности</b>			
Нормальная скорость распространения пламени, м/с	U <sub>n</sub>	г, ж	Скорость перемещения фронта пламени относительно несгоревшей смеси в направлении, перпендикулярном его поверхности
Температура воспламенения, °С	тв <sub>всп</sub>	ж, тв, пыли	Наименьшая температура горючего вещества, при которой в условиях специальных испытаний вещество выделяет горючие пары или газы с такой скоростью, что после их зажигания возникает устойчивое пламенное горение
Максимальное давление взрыва, кПа	P <sub>макс</sub>	г, ж, пыли	Наибольшее давление, возникающее при дефлаграционном взрыве газо-, паро- или пылевоздушной

Показатель пожарной опасности, единицы измерения	Обозначение	Агрегатное состояние	Определение
			смеси в замкнутом сосуде при начальном давлении горючей смеси 101,3 кПа
Скорость нарастания давления при взрыве, кПа/с	$(\partial p / \partial \tau)_{\max}$	г, ж, пыли	Производная давления взрыва по времени на восходящем участке зависимости давления взрыва газо-, паро- или пылевоздушной смеси в замкнутом сосуде от времени

Первая группа показателей необходима:

- при категорировании наружных установок по взрывопожарной опасности;
- при категорировании пожарной опасности помещений;
- при классификации и определении области применения веществ и материалов;
- при математическом моделировании пожара в здании (сооружении).

**Таблица 2- Показатели (критерии), характеризующие условия распространения пожара и его последствия (вторая группа)**

Показатель пожарной опасности, единицы измерения	Обозначение	Агрегатное состояние	Определение
<b>Общие показатели пожарной опасности</b>			
Способность к экзотермическому разложению		Г, ж, тв, пыли	Качественный показатель, характеризующий особую пожарную опасность некоторых веществ.
<b>Индивидуальные показатели пожарной опасности</b>			
	<b>жидкости</b>		
Максимальная скорость распространения пламени вдоль поверхности горючей жидкости, м/с	$U_{\text{макс}}$	ж	
<b>Групповые показатели пожарной опасности</b>			
Излучающая способность пламени	$t_{\text{восп}}$	ж, тв	Плотность теплового потока очага пожара непосредственно на поверхности пламени при горении материала при пожаре или в условиях специальных испытаний.
Концентрационные пределы		г, ж	Нижний и верхний концентрационные пределы распространения пла-

Показатель пожарной опасности, единицы измерения	Обозначение	Агрегатное состояние	Определение
диффузионного горения газовых смесей в воздухе % (об) Нижний предел Верхний предел	НКПР, $\varphi_n$ ВКПР, $\varphi_v$		мени – минимальное и максимальное содержание горючего в смеси, при которой возможно распространение пламени по смеси на любое расстояние от источника зажигания
Предельная скорость срыва диффузионного факела, м/с		Г, Ж	

Вторая группа показателей (совместно с первой группой) необходима:

- для классификации веществ и материалов;
- для определения вероятности воздействия опасных факторов пожара;
- для определения вероятности возникновения пожара, взрыва в здании, на объектах и наружных установках.

**Таблица 3 - Показатели (критерии), необходимые для разработки мероприятий, которые направлены на выбор и обоснование организационно-технических и инженерных решений по обеспечению пожаро- и взрывобезопасности изделий, зданий, технологических процессов и объектов (третья группа)**

Показатель пожарной опасности, единицы измерения	Обозначение	Агрегатное состояние	Определение
<b>Общие показатели пожарной опасности</b>			
Способность взрываться и гореть при взаимодействии с водой, кислородом и другими веществами		Г, ж, тв, пыли	Качественный показатель, характеризующий особую пожарную опасность некоторых веществ.
<b>Групповые показатели пожарной опасности</b>			
Концентрационные пределы распространения пламени (воспламенения) в газах и парах, в пылях, % или г/м <sup>3</sup>  Нижний предел	НКПР,	Г, ж, пыли	Нижний и верхний концентрационные пределы распространения пламени – минимальное и максимальное содержание горючего в смеси, при которой возможно распространение пламени по смеси на любое расстояние от источника зажигания

Показатель пожарной опасности, единицы измерения	Обозначение	Агрегатное состояние	Определение
Верхний предел	$\varphi_{\text{H}}$ ВКПР, $\varphi_{\text{В}}$		
Способность к воспламенению при адиабатическом сжатии		г, ж	
Минимальная энергия зажигания, Дж	$W_{\text{мин}}$	г, ж, пыли	Наименьшее значение энергии электрического разряда, способной воспламенить наиболее легковоспламеняющуюся смесь газа, пара или пыли с воздухом
Безопасный экспериментальный максимальный зазор БЭМЗ, мм	$\delta_{\text{без}}$	г, ж, пыли	Максимальный зазор между фланцами оболочки, через который не проходит передача взрыва из оболочки в окружающую среду при любой концентрации смеси в воздухе.
Минимальное взрывоопасное содержание кислорода МВСК,	$\varphi_{\text{O}_2}$	г, ж, пыли	Концентрация кислорода в горючей смеси, состоящей из горючего вещества, воздуха и флегматизатора, меньше которой распространение

Показатель пожарной опасности, единицы измерения	Обозначение	Агрегатное состояние	Определение
%			пламени в смеси становится невозможным при любой концентрации горючего в смеси, разбавленной данным флегматизатором.
Минимальная флегматизирующая концентрация флегматизатора МФКФ, %	$\Phi_{\text{ф}}$	Г, Ж, ТВ	Наименьшая концентрация флегматизатора в смеси с горючим и окислителем, при которой смесь становится неспособной к распространению пламени при любом соотношении горючего и окислителя
Выделение токсичных продуктов горения с единицы массы горючего, кг/кг		Ж, ТВ	
Потребление кислорода на единицу массы горючего, кг/кг		Ж, ТВ	
Скорость нарастания давления взрыва	$(\partial p / \partial t)_{\text{max}}$	Г, Ж, ПЫЛИ	Производная давления взрыва по времени на восходящем участке зависимости давления взрыва газо-, па-

Показатель пожарной опасности, единицы измерения	Обозначение	Агрегатное состояние	Определение
Па/с			ро- или пылевоздушной смеси в замкнутом сосуде от времени

### 3.1 Температура вспышки

*Температура вспышки* - это наименьшая температура конденсированного вещества, при которой в условиях специальных испытаний над его поверхностью образуются пары и газы, способные вспыхивать от источника зажигания; устойчивое горение при этом не возникает.

Температура вспышки является основным показателем пожарной опасности жидкостей.

По температуре вспышки все жидкости, способные гореть, классифицируются на легковоспламеняющиеся (ЛВЖ) с  $t_{всп}$  до 61°C включительно (в закрытом тигле) и горючие (ГЖ) с  $t_{всп}$  больше 61°C (в закрытом тигле).

Существует несколько способов расчета температуры вспышки.

#### 3.1.1 Расчет температуры вспышки

Температуру вспышки жидкостей ( $t_{всп}$ ) в закрытом тигле в °С, имеющих нижеперечисленные виды связей (таблица 4), вычисляют по формуле:

$$t_{всп} = a_0 + a_1 \cdot t_{кип} + \sum_{i=1}^n a_i \cdot l_i, \quad ^\circ\text{C} \quad (3.1)$$

где:

$a_0$  - размерный коэффициент, равный минус 73,14 °С;

$a_1$  - безразмерный коэффициент, равный 0,659;

$t_{кип}$  - температура кипения исследуемой жидкости, °С;

$a_j$  - эмпирические коэффициенты, приведённые в таблице 4 в зависимости от связей в структурной формуле вещества;

$l_j$  - количество связей вида  $j$  в молекуле исследуемой жидкости.

Средняя квадратичная погрешность расчета по этой формуле составляет 13°С.

Таблица 4 - Значения коэффициента  $a_j$  для различных видов связей

Вид связи	$a_j, ^\circ\text{C}$	Вид связи	$a_j, ^\circ\text{C}$
C—C	-2,03	C—C1	15,11
C ≡ C	-0,28	C—Br	19,40
C=C	1,72	C—Si	-4,84
C—H	1,105	Si—H	11,00
C—O	2,47	Si—Cl	10,07
C=O	11,66	N—H	5,83
C—N	14,15	O—H	23,90
CS≡N	12,13	S—H	5,64
C—S	2,09	P—O	3,27
C=S	-11,91	P=O	9,64

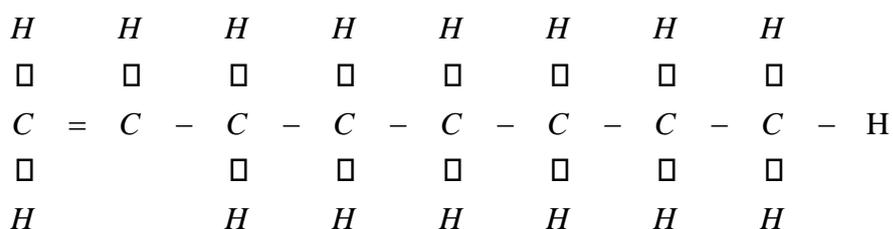
Вид связи	$a_j, ^\circ\text{C}$	Вид связи	$a_j, ^\circ\text{C}$
C—F	3,33		

**Пример 2.1.** Рассчитать температуру вспышки октена-1, бутанола-2 и метилбензола (толуола) по формуле (3.1).

Решение:

Для расчета используем данные таблицы 4.

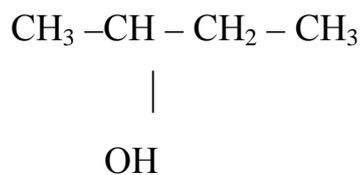
1. Октен-1 ( $t_{\text{кипения}} = 121,3^\circ\text{C}$ )



Связи	C – C	C = C	C – H
Число связей $l_j$	6	1	16
$a_j$	- 2,03	1,72	1,105

$$t_{\text{всп}} = -73,14 + 0,659 \cdot 121,3 + \\
 + [(-2,03) \cdot 6 + 1,72 \cdot 1 + 1,105 \cdot 16] = 14,0 \quad ^\circ\text{C}$$

1. Бутанол-2 ( $t_{\text{кипения}} = 99,5^\circ\text{C}$ )

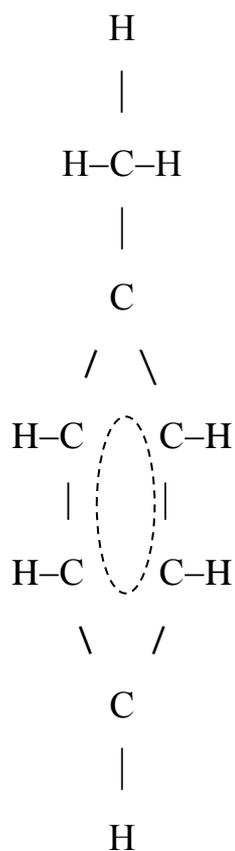


Связи	C – C	C – H	C – O	O – H
Число связей $l_j$	3	9	1	1
$a_j$	-2,03	1,105	2,47	23,9

$$t_{всп} = -73,14 + 0,659 \cdot 99,5 + \\ + [(-2,03) \cdot 3 + 2,47 \cdot 1 + 1,105 \cdot 9 + 23,9 \cdot 1] = 22,7 \text{ } ^\circ\text{C}$$

2. Метилбензол (толуол) ( $t_{\text{кипения}} = 110,6^\circ\text{C}$ )

$\text{C}_6\text{H}_5\text{CH}_3$  В бензольном кольце шесть «полуторных» связей.



Связи	C ≡ C	C – H	C – C
Число связей $l_j$	6	8	1
$a_j$	-0,28	1,105	-2,03

$$t_{всп} = -73,14 + 0,659 \cdot 110,6 + \\ + [(-0,28) \cdot 6 + (-2,03) \cdot 1 + 1,105 \cdot 8] = 4,8 \quad ^\circ\text{C}$$

### 3.1.2 Расчет температуры вспышки для некоторых классов соединений

Для перечисленных в таблице 5 классов веществ температуру вспышки в  $^\circ\text{C}$  вычисляют по формуле:

$$t_{всп} = a + b \cdot t_{кип} \quad (3.2)$$

где:

$a$ ,  $b$  — эмпирические коэффициенты, приведенные в таблице 5 вместе со средними квадратичными погрешностями расчета.

Таблица 5 – Эмпирические коэффициенты для расчета температуры вспышки

Класс веществ	Коэффициенты		
	$a$ , C	$b$	$\delta$ , C
Алканы	-73,22	0,693	1,5
Спирты	-41,69	0,652	1,4
Алкиланилины	-21,94	0,533	2,0
Карбоновые кислоты	-43,57	0,708	2,2

Класс веществ	Коэффициенты		
Алкилфенолы	-38,42	0,623	1,4
Ароматические углеводороды	-67,83	0,665	3,0
Альдегиды	-74,76	0,813	1,5
Бромалканы	-49,56	0,665	2,2
Кетоны	-52,69	0,643	1,9
Хлоралканы	-55,70	0,631	1,7

**Пример 2.2.** Рассчитать температуру вспышки 2-метилнонана и бутанола-2 по формуле (3.2).

Решение: Для решения воспользуемся данными таблицы 5.

Спирт

1. Алкан 2-метилнонан ( $t_{\text{кип}} = 167^{\circ}\text{C}$ )

$$t_{\text{всп}} = -73,22 + 0,693 \cdot 167 = 42,5 \text{ } ^{\circ}\text{C}$$

2. Спирт бутанол-2 ( $t_{\text{кипения}} = 99,5^{\circ}\text{C}$ )

$$t_{\text{всп}} = -41,69 + 0,652 \cdot 99,5 = 23,2 \text{ } ^{\circ}\text{C}$$

### 3.1.3 Расчет температуры вспышки по формуле Блинова

Существенная зависимость температуры вспышки и воспламенения от условий эксперимента вызывает определенные трудности при создании расчетного метода оценки их величины. Одним из наиболее

распространенных из них является полуэмпирический метод, предложенный В.И. Блиновым:

$$t_{\text{вс}} = \frac{B}{D_o \cdot \beta \cdot P_{\text{н.п.}}} \quad (3.3)$$

$t_{\text{вс}}$  – температура вспышки (воспламенения), К;

$P_{\text{н.п.}}$  – парциальное давление насыщенного пара жидкости при температуре вспышки (воспламенения), Па;

$D_o$  – коэффициент диффузии паров жидкости, с/м<sup>2</sup> (находим по справочным данным);

$\beta$  – количество молекул кислорода, необходимое для полного окисления одной молекулы горючего (определяется из уравнения материального баланса горения или по формуле);

$$\beta = n(C) + \frac{n(H) - n(X)}{4} - \frac{n(O)}{2} \quad (3.4)$$

$n(C)$ ,  $n(H)$ ,  $n(X)$ ,  $n(O)$  – число атомов углерода, водорода, галогенов и кислорода в молекуле горючего;

$B$  – константа метода определения.

При расчете температуры вспышки в замкнутом сосуде рекомендуется принимать  $B = 28$ , в открытом сосуде  $B = 45$ , а для расчета температуры воспламенения принимают  $B = 53$ .

Зависимость давления от температуры для некоторых веществ представлена в таблице 6.

Таблица 6 - Зависимость давления от температуры для некоторых веществ

Вещество	Давление, Па								
	1333,3	1333,2	2666,4	5332,9	7999,3	1333,2	2666,4	5332,9	1013,25
	Температура, К								
Ацетон	213,6	241,9	252,2	263,6	271,0	280,7	295,7	312,5	329,5
Альдегид уксусный	191,5	216,2	225,2	235,2	241,6	250,4	263,0	277,9	293,2
Ангидрид уксусный	274,7	309,0	325,0	335,1	343,8	355,2	373,0	392,8	412,6
Акриловая кислота	312,0	325,0	339,2	348,0	359,1	376,3	395,0	414,0	276,5
Аллиловый спирт	253,0	283,5	294,7	305,4	313,3	323,0	337,5	353,2	369,5
Амиловый спирт	286,0	317,9	328,8	244,0	348,5	358,8	375,0	392,8	410,8
Бензиловый спирт	331,0	365,6	378,8	392,8	402,3	414,7	433,0	456,0	477,7
Бензол	236,3	261,5	270,4	286,0	288,4	299,1	315,2	333,6	353,1
Бутиловый спирт	271,8	303,2	314,5	326,4	333,3	343,1	357,3	373,8	390,5
Бутиловый спирт (вторичный)	260,8	289,9	300,3	311,1	318,2	327,1	340,9	356,9	372,5
Бутиловый спирт (третичный)	252,6	278,5	287,3	297,5	304,0	312,8	325,7	314,0	355,9
Диэтиловый эфир	198,7	224,9	234,5	245,2	251,2	261,5	275,2	290,9	307,0
Изобутиловый спирт	264,0	294,7	307,3	317,1	324,7	334,5	348,9	364,4	381,0
Бромистый этил	198,7	225,5	235,2	246,3	253,5	263,0	287,5	294,0	311,4
Бутилбензол	295,7	335,0	349,3	365,4	275,6	389,2	409,4	432,2	456,1
Бутилформиат	246,6	279,1	291,0	304,6	312,8	324,0	340,9	359,2	379,0
Метилэтилкетон	224,2	255,3	266,5	279,0	287,0	298,0	314,6	333,0	352,6
Метилциклогексан	237,1	269,8	281,7	295,0	303,5	315,1	332,6	352,6	373,9
3-метил-2-бутинол	253,1	281,3	291,3	302,6	309,2	318,5	332,0	348,6	361,9
Метиловый спирт	229,0	256,8	267,0	278,0	285,1	294,2	307,8	322,9	337,7
Октан	259,0	281,3	304,5	318,1	326,8	338,7	356,6	377,0	398,6
Пропилбензол	279,3	316,4	329,8	344,6	354,1	-	386,5	408,7	432,2
Пропиловый спирт (вторичный)	299,1	275,4	285,7	296,8	303,5	312,5	326,0	340,8	355,5
Стирол	266,0	303,8	317,6	332,8	424,5	355,0	374,3	395,5	418,2
Сероуглерод	199,2	228,3	238,7	250,5	257,7	267,9	283,4	301,0	319,5
Толуол	246,3	279,4	291,4	304,8	313,3	324,9	342,5	262,5	383,6
Уксуснометиловый эфир	215,8	243,7	253,9	265,1	272,5	282,4	279,0	313,0	330,8
Уксуснопропиловый эфир	246,3	278,4	289,0	301,8	310,0	320,8	337,0	-	374,8
Уксусноэтиловый эфир	229,6	259,5	270,0	282,1	289,6	300,0	315,0	332,3	350,1
Этиловый спирт	241,7	270,7	281,0	292,0	299,0	307,9	321,4	336,5	351,4
Этилциклопентан	240,8	272,9	284,7	298,0	306,4	318,0	335,4	355,3	318,4
Этилбензол	263,2	298,9	311,6	325,8	334,8	347,1	365,7	386,8	409,2

**Пример 2.3.** Рассчитайте температуру вспышки бутанола, находящегося на воздухе в открытом тигле по формуле (3.3).

Исходные данные:

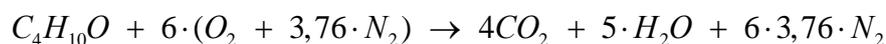
$C_4H_{10}O$  – бутанол (бутиловый спирт);

$B = 45$  (константа метода определения для определения температуры вспышки в открытом тигле);

$$D_0 = 0,081 \text{ см}^2/\text{с} = 8,1 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$$

Решение:

1. Стехиометрический коэффициент кислорода, определен исходя из уравнения материального баланса горения бутилового спирта в воздухе или по формуле (3.4):



$$\beta = 6$$

2. Подставляем имеющиеся значения в формулу (3.3):

$$t_{\text{вс}} \cdot P_{\text{н.п.}} = \frac{B}{D_0 \cdot \beta} = \frac{45}{8,1 \cdot 10^{-6} \cdot 6} = 9,25 \cdot 10^5$$

3. Предположим, что  $t_{\text{всп1}} = 271,8 \text{ К}$ , тогда  $P_{\text{н.п.1}} = 1333,3 \text{ Па}$  (по таблице б), тогда соотношение:

$$t_{\text{всп1}} \cdot P_{\text{н.п.1}} = 271,8 \cdot 1333,3 = 3,62 \cdot 10^5$$

– полученное значение меньше расчетного.

Выбираем следующее значение

$$t_{\text{всп2}} = 303,2 \text{ К}, \text{ тогда } P_{\text{н.п.2}} = 1333,2 \text{ Па.}$$

$$t_{\text{всп2}} \cdot P_{\text{н.п.2}} = 303,2 \cdot 1333,2 = 4,04 \cdot 10^5$$

– полученное значение также меньше расчетного.

Выбираем следующее значение  $t_{всп3} = 314,5$  К, тогда  $P_{н.п.3} = 2666,4$

Па.

$$t_{всп3} \cdot P_{н.п.3} = 314,5 \cdot 2666,4 = 8,38 \cdot 10^5$$

– полученное значение также меньше расчетного.

Выбираем следующее значение  $t_{всп4} = 326,4$  К, тогда  $P_{н.п.4} = 5332,9$

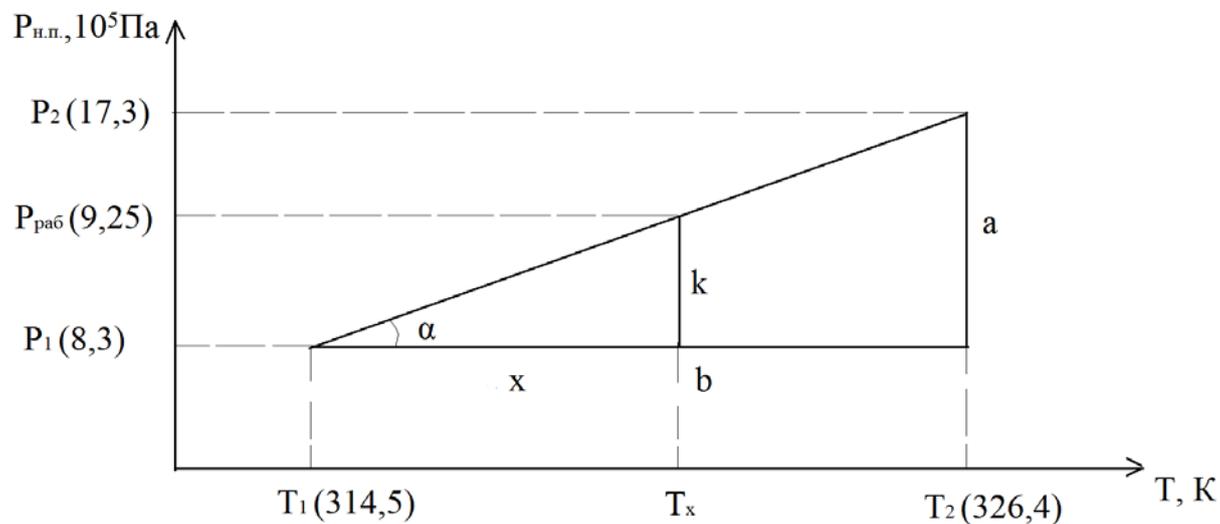
Па.

$$t_{всп4} \cdot P_{н.п.4} = 326,4 \cdot 5332,9 = 17,4 \cdot 10^5$$

– полученное значение больше расчетного.

4. Температура вспышки бутилового спирта находится между 314,5 и 326,4 К.

5. Рассчитаем температуру вспышки бутилового спирта при помощи признаков подобия треугольников, начертив для этого график зависимости температуры вспышки от давления:



$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{a}{b} = \frac{(P_2 - P_1)}{(T_2 - T_1)} = \frac{9 \cdot 10^5}{11,9} = 0,75 \cdot 10^5$$

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{k}{x}$$

$$x = \frac{k}{\operatorname{tg}\alpha} = \frac{(P_{\text{раб}} - P_1)}{0,75 \cdot 10^5} = 1,26$$

$$t_{\text{всп}} = T_1 + x = 314,5 + 1,25 = 315,75 \text{ K} \approx 316 \text{ K}$$

$$t_{\text{всп}} = 316 - 273 = 43 \text{ }^\circ\text{C}$$

(по справочным данным температура вспышки бутилового спирта в открытом тигле составляет 41 °С).

### 3.2 Расчет температуры воспламенения

*Температура воспламенения* - это наименьшая температура вещества, при которой в условиях специальных испытаний вещество выделяет горючие газы и пары с такой скоростью, что при воздействии источника зажигания наблюдается воспламенение жидкости.

#### 3.2.1 Расчет температуры воспламенения жидкости

Температура воспламенения жидкости рассчитывается по методике, изложенной в [3.6] по той же формуле что и температура вспышки, но со своими коэффициентами:

$$t_{\text{восп}} = a_0 + a_1 \cdot t_{\text{кип}} + \sum_{j=1}^n a_j \cdot l_j, \text{ }^\circ\text{C} \quad (3.5)$$

где:

$$a_0 = -47,78 \text{ }^\circ\text{C};$$

$$a_1 = 0,882;$$

$t_{\text{кип}}$  – температура кипения жидкости, °С;

$a_j$  – коэффициент j-той химической связи.

Значения коэффициентов приведены в таблице 7 и в приложении 3 [3.6];

$l_j$  – число химических связей вида  $j$  в молекуле жидкости

Таблица 7 – Эмпирические коэффициенты для расчета температуры воспламенения

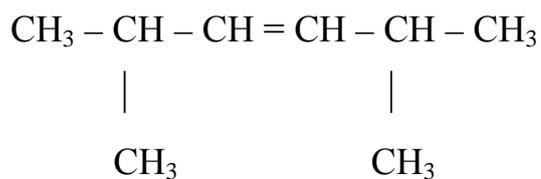
Вид связи	$a_j, ^\circ\text{C}$	Вид связи	$a_j, ^\circ\text{C}$
C—C	0,027	C=O	– 0,826
C $\equiv$ C	– 2,069	C—N	– 5,876
C=C	– 8,980	O—H	8,216
C—H	– 2,118	N—H	– 0,261
C—O	– 0,111		

Средняя квадратичная погрешность расчета составляет  $5 ^\circ\text{C}$ .

**Пример 2.4.** Рассчитать температуру воспламенения 2,5-диметилгексена-3 ( $t$  кипения =  $102,0^\circ\text{C}$ ) по формуле (3.5).

Решение: Для расчета воспользуемся данными таблицы 7.

2,5-диметилгексен-3



Связи	C – C	C = C	C – H
Число связей $l_j$	6	1	16
$a_j$	0,027	– 8,980	– 2,118

$$t_{\text{восн}} = -47,78 + 0,882 \cdot 102,0 + \\ + [0,027 \cdot 6 + (-8,980) \cdot 1 + (-2,118) \cdot 16] = 0,52 \quad ^\circ\text{C}$$

### 3.2.2 Расчет температуры воспламенения алифатических спиртов и сложных эфиров

Температуру воспламенения алифатических спиртов и сложных эфиров вычисляют по формуле

$$t_{\text{восн}} = \frac{t_{\text{кип}} + 273}{1 + K \cdot (t_{\text{кип}} + 273)} - 273 \quad ^\circ\text{C} \quad (3.6)$$

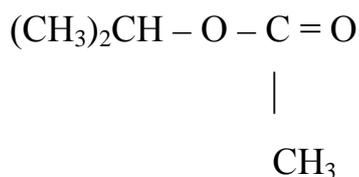
где:

$K$  – эмпирический коэффициент, равный  $6 \cdot 10^{-4}$  для спиртов и  $7 \cdot 10^{-4}$  для сложных эфиров.

Средняя квадратичная погрешность расчета составляет  $2^\circ\text{C}$  для спиртов и  $4^\circ\text{C}$  для сложных эфиров.

**Пример 2.5.** Рассчитать температуру воспламенения изопропилацетата (изопропилового эфира уксусной кислоты).  $t_{\text{кип}} = 89^\circ\text{C}$  по формуле (3.6).

Структурная формула сложного эфира изопропилацетата



$$t_{\text{восп}} = \frac{89 + 273}{1 + 7 \cdot 10^{-4} \cdot (89 + 273)} - 273 = 15,8 \text{ } ^\circ\text{C}$$

По справочным данным температура воспламенения и изопропилацетата составляет 5°C.

### 3.2.3 Расчет температуры воспламенения по формуле Блинова

Существенная зависимость температуры воспламенения от условий эксперимента вызывает определенные трудности при создании расчетного метода оценки их величины. Одним из наиболее распространенных из них является полуэмпирический метод, предложенный В.И. Блиновым по формуле (3.3):

**Пример 2.6.** Рассчитайте температуру воспламенения этанола, горение которого происходит в воздухе.

Исходные данные:

$\text{C}_2\text{H}_6\text{O}$  – этанол (этиловый спирт)

$V = 53$  (константа метода определения для определения температуры воспламенения)

$$D_0 = 0,132 \text{ см}^2/\text{с} = 13,2 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$$

Решение:

1. Находим стехиометрический коэффициент кислорода по формуле (3.4):

$$\beta = n(C) + \frac{n(H) - n(X)}{4} - \frac{n(O)}{2} = 2 + \frac{6}{4} - \frac{1}{2} = 3$$

2. Подставляем имеющиеся значения в формулу Блинова:

$$t_{\text{вс}} = \frac{B}{D_o \cdot \beta \cdot P_{\text{н.п.}}}$$
$$t_{\text{вс}} \cdot P_{\text{н.п.}} = \frac{B}{D_o \cdot \beta} = \frac{53}{13,2 \cdot 10^{-6} \cdot 3} = 13,38 \cdot 10^5$$

3. Предположим, что  $t_{\text{воспл1}} = 241,7 \text{ К}$ , тогда  $P_{\text{н.п.1}} = 1333,3 \text{ Па}$  (по таблице б), тогда найдем соотношение.

$$t_{\text{воспл1}} \cdot P_{\text{н.п.1}} = 241,7 \cdot 1333,3 = 3,22 \cdot 10^5$$

– полученное значение меньше расчетного.

Выбираем следующее значение  $t_{\text{воспл2}} = 270,7 \text{ К}$ , тогда  $P_{\text{н.п.2}} = 1333,2 \text{ Па}$ .

$$t_{\text{воспл2}} \cdot P_{\text{н.п.2}} = 270,7 \cdot 1333,2 = 3,6 \cdot 10^5$$

– полученное значение также меньше расчетного.

Выбираем следующее значение  $t_{\text{воспл3}} = 281 \text{ К}$ , тогда  $P_{\text{н.п.3}} = 2666,4 \text{ Па}$ .

$$t_{\text{воспл3}} \cdot P_{\text{н.п.3}} = 281 \cdot 2666,4 = 7,49 \cdot 10^5$$

– полученное значение также меньше расчетного

Выбираем следующее значение  $t_{\text{воспл4}} = 292 \text{ К}$ , тогда  $P_{\text{н.п.4}} = 5332,9 \text{ Па}$ .

$$t_{\text{воспл4}} \cdot P_{\text{н.п.4}} = 292 \cdot 5332,9 = 15,57 \cdot 10^5$$

– полученное значение больше расчетного.

4. Температура воспламенения этанола находится между 281 и 292 К.

5. Рассчитаем температуру воспламенения этанола методом интерполяции:

$T_3$ (281 К)	$T_x$	$T_4$ (292 К)
$P_3 \cdot T_3$ ( $7,49 \cdot 10^5$ Па)	$T_x \cdot P_x$ ( $13,38 \cdot 10^5$ )	$P_3 \cdot T_3$ ( $15,57 \cdot 10^5$ Па)

$$T_x = T_3 + \frac{(P_x T_x - P_3 T_3)}{(P_4 T_4 - P_3 T_3)} \cdot (T_4 - T_3) = 289 \text{ К}$$

$$t_{\text{воспл}} = 289 - 273 = 16 \text{ }^\circ\text{C}$$

(по справочным данным температура воспламенения этанола составляет  $18 \text{ }^\circ\text{C}$ ).

### 3.3 Температура самовоспламенения

*Температура самовоспламенения - это наименьшая температура окружающей среды, при которой в условиях специальных испытаний наблюдается самовоспламенение вещества.*

Температура самовоспламенения относится к числу важнейших показателей пожарной опасности. Ее используют при оценке пожаро-взрывоопасности веществ, при определении группы взрывоопасности горючей смеси и т.д.

Температура самовоспламенения **не является константой для конкретного вещества**, а зависит от множества факторов таких как:

1. **Объем реакционного сосуда** (при увеличении объема реакционного сосуда температура самовоспламенения уменьшается);

2. **Геометрическая форма сосуда** (чем меньше удельная поверхность, т.е. отношение площади поверхности к объему сосуда  $[S/V]$ , тем температура самовоспламенения ниже. При этом, среди всех геометрических форм сосудов при равных объемах, наименьшая температура самовоспламенения будет в сосуде в виде шара);

3. **Состав горючей смеси, т.е. концентрация горючего и окислителя** (график зависимости имеет вид параболы с вершиной в точке со стехиометрической концентрацией. Т.е. температура самовоспламенения смеси минимальна при стехиометрической концентрации горючего и окислителя);

4. **Давление окружающей среды** (с увеличением давления, температура самовоспламенения уменьшается);

5. **Наличие катализаторов или ингибиторов**

6. **С увеличением длины углеводородной цепи в гомологических рядах температура самовоспламенения уменьшается.**

В связи с этим, возникает проблема: с одной стороны температура самовоспламенения сильно зависит от множества факторов, с другой – необходимо все-таки как-то анализировать пожарную опасность процессов, аппаратов или технологий с обращением ГГ или ГЖ и предусматривать меры профилактики.

Чтобы исключить этот отрицательный момент, в нашей стране и за рубежом законодательным путем установлены одинаковые для всех лабораторий условия испытаний, зафиксированные в [1]. Следует отметить, что методика эта универсальна и применяется для определения температуры самовоспламенения газов, жидкостей и твердых горючих веществ.

В настоящее время температура самовоспламенения определена для многих веществ, и ее можно найти в справочной литературе. Одна-

ко не для всех. Для алканов, ароматических углеводородов и алифатических спиртов она может быть приближенно рассчитана по условной средней длине молекулы соединения.

Методика расчета  $T_{св}$  сводится к определению средней длины углеродной цепи в молекуле данного класса соединения, а затем определения  $T_{св}$  по таблицам 8-10.

Таблица 8 - Температура самовоспламенения в К предельных углеводородов в зависимости от средней длины углеродной цепи

$L_{ср}$	$T_{св}$								
4	686	6	507	8	488	10	479	12	477
4,1	680	6,1	505	8,1	487	10,1	479	12,1	477
4,2	673	6,2	504	8,2	486	10,2	479	12,2	477
4,3	665	6,3	503	8,3	486	10,3	479	12,3	477
4,4	654	6,4	502	8,4	485	10,4	478	12,4	477
4,5	643	6,5	501	8,5	484	10,5	478	12,5	477
4,6	631	6,6	500	8,6	484	10,6	478	12,6	477
4,7	617	6,7	499	8,7	483	10,7	478	12,7	477
4,8	601	6,8	498	8,8	483	10,8	478	12,8	477
4,9	581	6,9	497	8,9	482	10,9	478	12,9	477
5	560	7	496	9	482	11	478	13	477
5,1	547	7,1	495	9,1	481	11,1	478	13,1	477
5,2	535	7,2	494	9,2	481	11,2	478	13,2	477
5,3	528	7,3	494	9,3	481	11,3	478	13,3	477
5,4	522	7,4	49	9,4	480	11,4	478	13,4	477
5,5	517	7,5	492	9,5	480	11,5	478	13,5	477
5,6	513	7,6	491	9,6	480	11,6	478	13,6	477
5,7	511	7,7	490	9,7	480	11,7	477	13,7	476
5,8	509	7,8	489	9,8	479	11,8	477	13,8	476
5,9	508	7,9	489	9,9	479	11,9	477	13,9	476

Таблица 9 - Температура самовоспламенения в К предельных одноатомных спиртов в зависимости от средней длины углеродной цепи

$L_{ср}$	$T_{св}$														
2	737	3,3	686	4,6	602	5,9	564	7,2	539	8,5	524	9,8	513	15,5	502

L <sub>ср</sub>	T <sub>св</sub>														
2,1	736	3,4	678	4,7	599	6	562	7,3	537	8,6	523	9,9	513	16	501
2,2	734	3,5	669	4,8	595	6,1	560	7,4	536	8,7	522	10	512	16,5	501
2,3	732	3,6	658	4,9	592	6,2	557	7,5	535	8,8	521	10,5	509	17	500
2,4	730	3,7	679	5	588	6,3	555	7,6	534	8,9	520	11	507	17,5	500
2,5	728	3,8	642	5,1	585	6,4	553	7,7	533	9,0	519	11,5	506		
2,6	725	3,9	634	5,2	582	6,5	551	7,8	531	9,1	519	12	505		
2,7	721	4	628	5,3	579	6,6	549	7,9	530	9,2	518	12,5	505		
2,8	716	4,1	623	5,4	577	6,7	547	8	529	9,3	517	13	504		
2,9	711	4,2	619	5,5	574	6,8	545	8,1	528	9,4	516	13,5	504		
3	706	4,3	614	5,6	572	6,9	543	8,2	527	9,5	516	14	503		
3,1	696	4,4	610	5,7	569	7	542	8,3	526	9,6	515	14,5	503		
3,2	693	4,5	606	5,8	567	7,1	540	8,4	528	9,7	514	15	502		

Таблица 10 - Температура самовоспламенения ароматических углеводородов в зависимости от средней длины углеродной цепи, К

L <sub>ср</sub>	T <sub>св</sub>												
-2	843	-1	835	0	819	1,0	712	2,0	703	3,0	697		
-1,9	842	-0,9	835	0,1	810	1,1	711	2,1	702	3,1	697		
-1,8	841	-0,8	834	0,2	794	1,2	710	2,2	701	3,2	697		
-1,7	840	-0,7	833	0,3	774	1,3	709	2,3	701	3,3	697		
-1,6	840	-0,6	832	0,4	753	1,4	708	2,4	700	3,4	696	4,0	695
-1,5	839	-0,5	831	0,5	733	1,5	707	2,5	700	3,5	696		
-1,4	838	-0,4	830	0,6	723	1,6	706	2,6	699	3,6	696		
-1,3	837	-0,3	829	0,7	718	1,7	705	2,7	699	3,7	696		
-1,2	837	-0,2	827	0,8	715	1,8	704	2,8	698	3,8	696		
-1,1	836	-0,1	824	0,9	713	1,9	703	2,9	698	3,9	696		

Расчет длины цепей для каждого класса соединений имеет свои особенности.

Расчетные формулы:

$$L_{ср} = \frac{\sum_{i=1}^n (N_i \cdot C_i)}{\sum_{i=1}^n N_i} \quad (3.7)$$

где  $C_i$ -длина  $i$ -той углеродной цепи в молекуле,

$\sum_{i=1}^k N_i$  - число цепей, определяемая по формуле (3.8).

$$\sum_{i=1}^n N_i = \frac{S \cdot (S - 1)}{2} \quad (3.8)$$

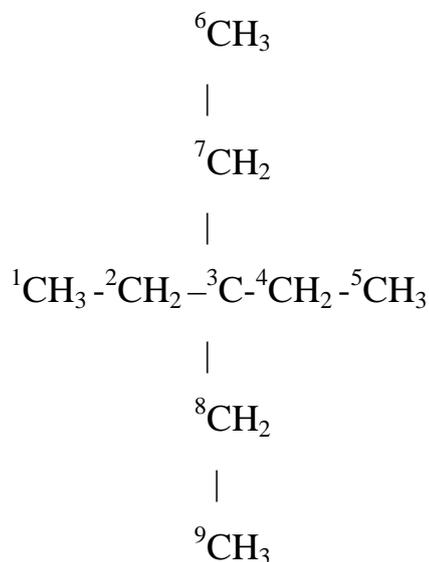
где  $S$  - число концевых групп в молекуле(  $-CH_3$ ,  $-C_6H_5$  и т.д.)

Для спиртов алифатического ряда концевой считается и гидроксильная группа  $-OH$ . Из общего числа цепей последовательно выбирают цепи с одинаковым числом углеродных атомов, причем для ароматических соединений атомы углерода ароматического ядра в расчет не включаются. Для спиртов расчетная длина цепи, содержащая гидроксильную группу, увеличивается на единицу по сравнению с фактической углеродной цепью. Для ароматических соединений длина цепи, содержащая арильный радикал, уменьшается на единицу по сравнению фактической длиной.

**Пример 2.7** Рассчитать температуру самовоспламенения 3,3-диэтилпентана и определить безопасную температуру нагрева неизолированных поверхностей.

Решение:

1. Написать структурную формулу соединения, пронумеровать все атомы углерода в молекуле и определить общее число цепей.



2. Найти состав цепей с одинаковым числом атомов углерода (5): 1-2-3-4-5, 1-2-3-8-9, 1-2-3-7-6, 5-4-3-7-6, 5-4-3-8-9, 6-7-3-8-9. В данном случае длина всех цепей одинакова.

3. Определить среднюю длину цепи.

$$L_{CP} = \frac{\sum_{i=1}^n (N_i \cdot C_i)}{\sum_{i=1}^n N_i} = \frac{6 \cdot 5}{6} = 5$$

По таблице 8 находим  $T_{св} = 560$  К или  $287^{\circ}\text{C}$ .

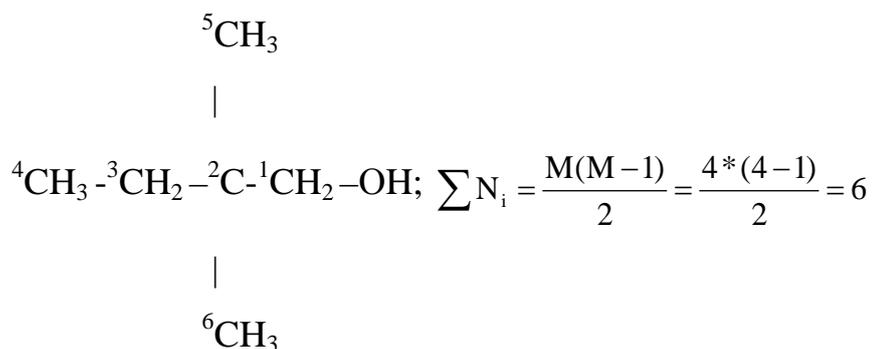
Безопасная температура нагрева неизолированных поверхностей технологического оборудования составляет 80% от  $T_{св}$ , т.е.

$$T_{БЕЗ} = 0,8 \cdot T_{св} = 0,8 \cdot 287 = 229,6 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

**Пример 2.8** Рассчитать температуру самовоспламенения 2, 2 -диметилбутанола-1 и определить безопасную температуру.

Решение:

1. Написать структурную формулу, пронумеровать все углеродные атомы и определить общее число цепей. (группа ОН считается концевой).



2. Определить состав и число цепей.

Цепь	Длина цепи, С	Количество цепей
ОН-1-2-3-4	5	1
4-3-2-5	4	4
4-3-2-6		
ОН-1-2-6		
ОН-1-2-5		
5-2-6	3	1

3. Определить среднюю длину цепи.

$$L_{CP} = \frac{\sum_{i=1}^n (N_i \cdot C_i)}{\sum_{i=1}^n N_i} = \frac{5 \cdot 1 + 4 \cdot 4 + 3 \cdot 1}{6} = 3,81$$

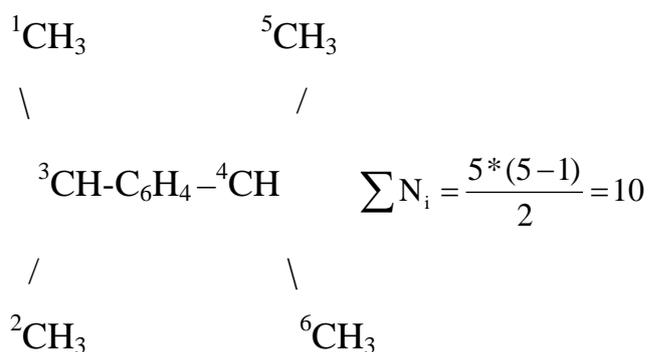
По таблице 9 находим  $T_{св} = 642 \text{ К}$  или  $369^\circ\text{C}$ . Безопасная температура:

$$T_{БЕЗ} = 0,8 \cdot T_{св} = 0,8 \cdot 369 = 295,2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

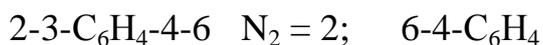
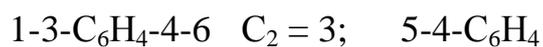
**Пример 2.9** Рассчитать температуру самовоспламенения 1,4-диизопропилбензола, определить безопасную температуру.

Решение:

1. Написать структурную формулу соединения, пронумеровать углеродные атомы алифатических цепей. Учесть, что арильный радикал - C<sub>6</sub>H<sub>4</sub>- выполняет функцию концевой группы и промежуточной, но уменьшает фактическую длину цепи, куда он входит на единицу.



2. Определить число цепей с одинаковым числом углеродных атомов.



C<sub>1</sub> = 3;

N<sub>1</sub> = 4.

3. Определить среднюю длину цепи

$$L_{CP} = \frac{\sum_{i=1}^n (N_i \cdot C_i)}{\sum_{i=1}^n N_i} = \frac{4 \cdot 3 + 2 \cdot 3 + 4 \cdot 1}{10} = 2,2$$

По таблице 10 находим  $T_{св} = 701 \text{ К}$  или  $428 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Безопасная температура

$$T_{БЕЗ} = 0,8 \cdot T_{св} = 0,8 \cdot 428 = 342,4 \text{ }^\circ\text{C}$$

Так как данная концентрация горючего является стехиометрической то для решения данной задачи необходимо записать уравнение реакции горения вещества в воздухе.

### **3.4 Концентрационные пределы распространения пламени**

При утечке горючих газов и жидкостей из аппаратов в воздухе образуются смеси, в которых концентрация горючего может изменяться в широких пределах - от долей процента до 100 %. Способность этих смесей к воспламенению различна.

*Нижний и верхний концентрационный предел распространения пламени (воспламенения) - соответственно, минимальное и максимальное содержание горючего вещества в однородной смеси с окислительной средой, при котором возможно распространение пламени по смеси на любое расстояние от источника зажигания. Обозначается НКПР ( $\varphi_{н}$ ) и ВКПР ( $\varphi_{в}$ ).*

КПР применяют при расчете взрывобезопасных концентраций газов, паров, пылей в воздухе рабочей зоны, внутри технологического оборудования, трубопроводов, при проектировании вентиляционных систем.

КПР связаны с критической скоростью распространения пламени, которая, в свою очередь, зависит от скорости реакции, температуры горения и т.д. Следовательно, КПР зависят от химических, теплофизи-

ческих свойств, а также параметров состояния горючего вещества и окислителя. Основными из них являются:

- 1. Химическая природа горючего и окислителя*
- 2. Начальная температура смеси*
- 3. Начальное давление смеси*
- 4. Наличие флегматизаторов и ингибиторов*

Интервал концентраций газообразного или парообразного горючего в смеси с воздухом выше нижнего концентрационного предела распространения пламени (НКПР или  $\varphi_n$ ) и ниже верхнего концентрационного предела распространения пламени (ВКПР или  $\varphi_v$ ) называется областью распространения пламени (воспламенения).

Концентрации ниже НКПР называются взрывопожаробезопасными, а концентрации в области воспламенения - взрывопожароопасными. Концентрации выше ВКПР пожароопасны, т.к. в случае нарушения герметичности емкости произойдет разбавление газа или пара воздухом и возможно возникновение взрыва или пожара при наличии источника зажигания.

Знание области взрывобезопасных концентраций дает возможность в процессах транспортировки, хранения и применения горючих жидкостей и газов поддерживать такой режим, при котором обращение с ними не будет связано с опасностью возникновения взрыва.

### **3.4.1 Расчет КПР по аппроксимационной формуле**

Методика расчета КПР регламентируется в приложении 4 [3.6].

Приблизительно КПР газов и паров в воздухе при атмосферном давлении для большинства органических соединений можно рассчитать с точностью, достаточной для практических нужд по формуле:

$$\varphi_{н(в)} = \frac{100}{a \cdot \beta + b}, \% \text{ об.} \quad (3.9)$$

где:

$\beta$  - стехиометрический коэффициент перед кислородом в уравнении реакции горения, а и b - универсальные константы, приведенные в таблице 11 .

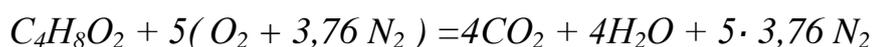
Таблица 11 – Универсальные константы для расчета КПР

КПР	a	b
НКПР	8,684	4,679
ВКПР		
$\beta \leq 7,5$	1,550	0,560
$\beta > 7,5$	0,768	6,554

**Пример 2.10** Рассчитать концентрационные пределы распространения пламени бутановой кислоты  $C_4H_8O_2$  по формуле (3.9).

Решение:

1. Составляем уравнение реакции горения бутановой кислоты.



$$\beta = 5$$

2.

$$\varphi_n = \frac{100}{8,684 \cdot 5 + 4,679} = 2,07 \% \text{ об.}$$

$$\varphi_e = \frac{100}{1,550 \cdot 5 + 0,560} = 12,03 \% \text{ об.}$$

### 3.4.2 Расчет КПР по известной теплоте образования

Если известно значение энтальпии (теплоты) образования, НКПР может быть рассчитан по формуле

$$\varphi_u = \frac{100}{h_C \cdot n_C + h_H \cdot n_H + h_O \cdot n_O + h_N \cdot n_N + h_f \cdot \Delta H_f^0 + 1}, \% \text{ об} \quad (3.10)$$

где

$n_C, n_H, n_O, n_N$  - число атомов С, Н, О, N в молекуле горючего;

коэффициенты

$$h_C = 8,737; \quad h_H = 2,757; \quad h_O = -0,522; \quad h_N = -0,494; \quad ; \quad h_f = 2,36 \cdot 10^{-2}$$

кДж/моль;

$\Delta H_f^0$  - стандартная теплота образования горючего вещества, кДж/моль.

**Пример 2.11** Вычислить нижний концентрационный предел распространения пламени изопропилового спирта (пропанола-2)  $C_3H_7OH$  по формуле (3.10).

Теплота образования пропанола-2 составляет  $\Delta H_f^0$  ( $C_3H_7OH$ ) = -320,3 кДж/моль.

Решение:

Для изопропилового спирта  $C_3H_7OH$ :  $n_C = 3, n_H = 8, n_O = 1$

$$\varphi_u = \frac{100}{8,737 \cdot 3 + 2,757 \cdot 8 + (-0,494) \cdot 1 + 2,36 \cdot 10^{-2} \cdot (-320,3) + 1} = 2,43 \% \text{ об}$$

По справочным данным НКПР изопропилового спирта составляет 2,23 %.

### 3.4.3 Расчет концентрационных пределов распространения пламени для смесей газов

Для смесей газов, нижний и верхний КПР, упрощенно можно определить по формуле Ле-Шателье:

$$\varphi_{n(\varepsilon)}^{\text{смеси}} = \frac{100}{\sum_{i=1}^n \frac{\varphi_i}{\varphi_{n(\varepsilon)_i}}}, \% \text{ об.} \quad (3.11)$$

где:

$\varphi_i$  - концентрация компонента в смеси, в % об.;

$\varphi_{n[\text{в}]}i$  - НКПР или ВКПР каждого компонента в % об. соответственно.

**Пример 2.12.** Рассчитать КПР смеси газов по формуле (3.11) следующего состава: угарный газ CO – 10 %; водород H<sub>2</sub> – 60 %; метан CH<sub>4</sub> – 30 %.

1. Определяем НКПР и ВКПР каждого горючего компонента (по справочным данным или расчетным путем):

для угарного газа	$\varphi_{\text{н}} = 12,5 \%$ ;	$\varphi_{\text{в}} = 74 \%$
для водорода	$\varphi_{\text{н}} = 4 \%$ ;	$\varphi_{\text{в}} = 75 \%$
для метана	$\varphi_{\text{н}} = 5 \%$ ;	$\varphi_{\text{в}} = 15 \%$

2. Определяем НКПР и ВКПР для смеси газов:

$$\varphi_n^{смеси} = \frac{100}{\frac{10,0}{12,5} + \frac{60,0}{4,0} + \frac{30,0}{5,0}} = 4,58 \text{ \% об.}$$

$$\varphi_a^{смеси} = \frac{100}{\frac{10,0}{74,0} + \frac{60,0}{75,0} + \frac{30,0}{15,0}} = 34,0 \text{ \% об.}$$

### 3.5 Температурные пределы распространения пламени

*Нижним (НТПР) или верхним (ВТПР) температурным пределом распространения пламени называется температура жидкости, при которой концентрация паров над ее поверхностью равна соответствующему концентрационному пределу.*

Расчет температурных пределов распространения пламени основывается на нахождении таких температур жидкости, при которых концентрация насыщенных паров соответствует нижнему (НКПР) и верхнему (ВКПР) концентрационным пределам распространения пламени. Методика расчета регламентируется приложением 6 [3.6].

#### 3.5.1 Расчет температурных пределов распространения пламени по известной зависимости давления насыщенного пара от температуры

Если известна зависимость давления насыщенного пара от температуры, то значение нижнего или верхнего температурного предела распространения пламени ( $t_n$ ) в °С вычисляют по соответствующему значению концентрационного предела распространения пламени ( $\varphi_{КПР}$ ) по формуле:

$$t_{II} = \frac{B}{A - \lg(\varphi_{КПР} \cdot P_0 \cdot 0,01)} - C_A \quad (3.12)$$

где:

$A, B, C_A$  — константы уравнения Антуана;

$p_0$  — атмосферное давление, кПа.

**Пример 2.13.** Вычислить температурные пределы распространения пламени 2-метилнонана по формуле (3.12), если известны следующие данные:

НКПР 0,71 %;

ВКПР 5,4 %;

уравнение Антуана  $\lg p = 6,12003 - 1521,3/(202,75 + t)$ ;

$P_0 = 101,3$  кПа.

Решение:

Расчет НТПР:

$$t_{НТПР} = \frac{1521,3}{6,12003 - \lg(0,71 \cdot 101,3 \cdot 0,01)} - 202,75 = 40,1 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Расчет ВТПР:

$$t_{ВТПР} = \frac{1521,3}{6,12003 - \lg(5,4 \cdot 101,3 \cdot 0,01)} - 202,75 = 79,9 \text{ } ^\circ\text{C}$$

### 3.5.2 Расчет температурных пределов распространения пламени для веществ, состоящих из атомов С, Н, О, N

Если неизвестна зависимость давления насыщенного пара от температуры, то для веществ, состоящих из атомов С, Н, О, N значение нижнего или верхнего температурного предела ( $t_n$ ) вычисляют по формуле, аналогичной формулам для расчета температуры вспышки и температуры воспламенения, но со своими коэффициентами

$$t_{n(в)} = a_0 + a_1 \cdot t_{кин} + \sum_{i=1}^n a_i \cdot l_i, \quad ^\circ C \quad (3.13)$$

где:

$a_0$  — размерный коэффициент, равный минус 62,46°С для нижнего и минус 41,43°С для верхнего пределов;

$a_1$  — безразмерный коэффициент, равный 0,655 для нижнего и 0,723 для верхнего пределов;

$a_j$  — эмпирические коэффициенты, характеризующие вклад  $j$ -х структурных групп, приведены в таблице 12.

Таблица 12 – Эмпирические коэффициенты для расчета температурных пределов распространения пламени

Вид структурной группы	$a_j, ^\circ C$		Вид структурной группы	$a_j, ^\circ C$	
	$t_n$	$t_b$		$t_n$	$t_b$
С—С	-0,909	-1,158	С—N	-2,14	0,096
С=C	-2,66	-4,64	N—H	6,53	6,152
С—Н	-0,009	0,570	O—H	19,75	17,80
С—O	0,110	1,267		-4,40	-4,60
С=O	5,57	5,86			



Связи		C – H	C – C
a <sub>j</sub> для НТПР	– 4,40	– 0,009	– 0,909
a <sub>j</sub> для ВТПР	– 4,60	0,570	– 1,158

Расчет НТПР:

$$t_n = -62,46 + 0,655 \cdot 159 + [(-4,40) \cdot 1 + (-0,009) \cdot 12 + (-0,909) \cdot 3] = 34,2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Расчет ВТПР:

$$t_n = -41,43 + 0,723 \cdot 159 + [(-4,60) \cdot 1 + 0,57 \cdot 12 + (-1,158) \cdot 3] = 72,3 \text{ } ^\circ\text{C}$$

### 3.6 Нормальная скорость распространения пламени

*Нормальная скорость распространения пламени—скорость перемещения фронта пламени относительно несгоревшего газа в направлении, перпендикулярном к его поверхности.*

Значение нормальной скорости распространения пламени применяется

- в расчетах скорости нарастания давления взрыва газо- и паровоздушных смесей в закрытом, негерметичном оборудовании и помещениях,

- критического (гасящего) диаметра при разработке и создании огнепреградителей,

- площади легкобрасываемых конструкций, предохранительных мембран и других разгерметизирующих устройств;

- при разработке мероприятий по обеспечению пожаровзрывобезопасности технологических процессов в соответствии с требованиями ГОСТ 12.1.004 и ГОСТ 12.1.010.

Сущность экспериментального метода определения нормальной скорости распространения пламени заключается в приготовлении горючей смеси известного состава внутри реакционного сосуда, зажигания смеси в центре точечным источником, регистрации изменения во времени давления в сосуде и обработке экспериментальной зависимости “давление—время” с использованием математической модели процесса горения газа в замкнутом сосуде и процедуры оптимизации. Математическая модель позволяет получить расчетную зависимость “давление—время”, оптимизация которой по аналогичной экспериментальной зависимости дает в результате изменение нормальной скорости в процессе развития взрыва для конкретного испытания.

Очень важной особенностью фронта пламени является то, что нормальная скорость его распространения представляет собой также объемную скорость горения газовой смеси:

$$u_n = [ \text{м}^3 / (\text{м}^2 \cdot \text{с}) ] = [ \text{м/с} ]$$

т.е. показывает, сколько объемов смеси сгорает в единицу времени на единице площади фронта пламени. Это позволяет для любого газа определить массовую скорость горения  $u_m$ :

$$u_m = u_n \cdot \rho_0 \quad (36)$$

где  $\rho_0$  - плотность исходной горючей смеси,  $\text{кг/м}^3$ .

Это выражение широко используется в теории распространения пламени в паро- и газо-воздушных смесях при исследовании материального и теплового, балансов процессов горения.

Для пожарно-технических расчетов используют максимальную нормальную скорость горения.

*Максимальная нормальная скорость горения  $S_u$  – максимальная линейная скорость распространения фронта пламени в газовых смесях, определяемая в специальных условиях.*

1. Расчет максимальной нормальной скорости распространения пламени

для органических веществ, состоящих из атомов С, Н, N, О, S и структурных групп, представленных в таблице 13, вычисляется по формуле:

$$S_u = S_{u_0} + \frac{(\sum_{j=1}^k m_j \cdot h_j)}{n_c^{\alpha_1}} \quad (3.14)$$

где:

$m_j$  - число структурных групп j-го вида в молекуле;

$h_j$  - коэффициент, соответствующий j-й структурной группе;

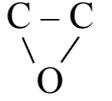
$n_c$  – число атомов углерода в молекуле;

$\alpha_1$  - показатель степени, равный двум;

$S_{u_0}$  – значение нормальной скорости горения для алканов, равное 0,40 м/с.

Таблица 13 – Коэффициенты для расчета нормальной скорости распространения пламени

Структурная группа	$h_j$ , м/с	Структурная группа	$h_j$ , м/с
C=C	1,14	-CO-	0,42
C≡C	3,34	-COO-	- 0,64

-O-H	0,15	-O-	0,45
-NH <sub>2</sub> , -NH-, -N<	- 0,5		- 0,84
Cl* (для соединений, содержащих атом Cl в молекуле)	-1,21		2,5
-CHO	0,75	Неароматический цикл	0,45

Для массива данных, представленных в таблице 13, относительная средняя квадратичная погрешность расчета составляет 10,6%.

**Пример 2.15** Рассчитать максимальную нормальную скорость горения по формуле (3.14) для диэтилового эфира C<sub>2</sub>H<sub>5</sub> – O – C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>.

Решение:

Диэтиловый эфир                      H<sub>3</sub>C – H<sub>2</sub>C – O – CH<sub>2</sub> – CH<sub>3</sub>

В молекуле диэтилового эфира кроме связей, присущих алканам, имеется структурная группа – O –. Количество атомов углерода равно четырем.

$$S_u = 0,40 + \frac{1 \cdot 0,45}{4^2} = 0,43 \text{ м/с}.$$

### 3.7 Критический диаметр огнегасящего канала и безопасного экспериментального максимального зазора

Расчет критического диаметра  $d_{кр}$  длинного цилиндрического огнегасящего канала производится по формуле:

$$d_{кр} = \frac{Pe_{кр} \cdot \lambda \cdot R \cdot T}{Su \cdot C_{pV} \cdot P \cdot M} \quad (3.15)$$

где:

$Pe_{кр}$  – число Пекле;

$S_u$  – нормальная скорость горения, м/с;

$C_{pV}$  – удельная теплоемкость горючей смеси при постоянном давлении, Дж/кг·К;

$\lambda$  – коэффициент теплопроводности исходной смеси, Вт/м·К;

$T$  – рабочая (начальная) температура, К;

$P$  – давление горючей смеси, Па;

$R$  – универсальная газовая постоянная, Дж/моль·К;

$M$  – средняя молярная масса горючей смеси, кг/моль.

***Безопасный максимальный экспериментальный зазор (БЭМЗ)***

– максимальный зазор между фланцами оболочки, через который не происходит передача взрыва из оболочки в окружающую среду при любой концентрации горючего в воздухе.

Безопасный максимальный экспериментальный зазор (БЭМЗ) рассчитывается по формуле:

$$БЭМЗ = \frac{d_{кр}}{3} \quad (3.16)$$

Относительная средняя квадратичная погрешность расчета составляет 18%.

***Пример 2.16*** Рассчитать критический диаметр длинного цилиндрического огнегасящего канала по формуле (3.15) и безопасный экспериментальный зазор по формуле (3.16) для ацетона  $C_3H_6O$ .

Решение:

Расчет проводят для горючей смеси стехиометрического состава.

1. Число Пекле на пределе гашения пламени составляет 60-80.

Для расчета принимаем  $Re_{кр} = 70$

2. Максимальная нормальная скорость горения ацетона по справочным данным составляет  $S_u = 0,44$  м/с.

Нормальную скорость горения определяют по справочным данным или расчетным методом (см. п.3.6.)

3. Для расчета теплоемкости, теплопроводности и средней молярной массы горючей смеси необходимо определить объемные доли пара ( $\varphi_r$ ) и воздуха  $\varphi_v = (1 - \varphi_r)$  в газоздушном смеси.

$\varphi_r$  (в долях) рассчитывается по уравнению реакции горения вещества.

Для ацетона:



$$\varphi_r = \frac{1}{1 + 4,76 \cdot \beta} = \frac{1}{1 + 4,76 \cdot 4} = 0,05$$

4. Удельная теплоемкость горючей смеси  $C_p$  при постоянном давлении определяются по формуле:

$$C_p = \varphi_r \cdot C_{p,r} + (1 - \varphi_r) \cdot C_{p,v}, \quad \frac{Дж}{кг \cdot К} \quad (3.17)$$

где  $C_{p,r} = 1269$  Дж/(кг·К) - теплоемкость ацетона (газ);

$C_{p,v} = 1005$  Дж/(кг·К) - теплоемкость воздуха.

$$C_p = 0,05 \cdot 1269 + 0,95 \cdot 1005 = 1018 \quad \frac{Дж}{кг \cdot К}$$

5. Коэффициент теплопроводности горючей смеси определяется по формуле:

$$\lambda = \varphi_{\Gamma} \cdot \lambda_{\Gamma} + (1 - \varphi_{\Gamma}) \cdot \lambda_{\text{в}}, \text{ Вт/м}\cdot\text{К} \quad (3.18)$$

где  $\lambda_{\Gamma} = 0,0167 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$  – коэффициент теплопроводности ацетона (газ);

$\lambda_{\text{в}} = 0,0259 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$  – коэффициент теплопроводности воздуха, значение для  $T = 293 \text{ К}$ ;

Значения коэффициентов теплопроводности – справочные данные

$$\lambda = 0,05 \cdot 0,0167 + (1 - 0,05) \cdot 0,0259 = 0,025 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$$

6. Рабочая (начальная) температура принимается  $T = 298 \text{ К}$  (стандартные условия).
7. Давление горючей смеси принимается равным атмосферному давлению  $P = 10^5 \text{ Па}$ .
8. Универсальная газовая постоянная  $R = 8,31 \text{ Дж/моль}\cdot\text{К}$ .
9. Средняя молярная масса горючей смеси определяется по формуле:

$$M = \varphi_{\Gamma} \cdot M_{\Gamma} + (1 - \varphi_{\Gamma}) \cdot M_{\text{в}}, \text{ кг/кмоль} \quad (3.19)$$

где  $M_{\Gamma} = 58 \text{ г/моль}$  (кг/кмоль) – молярная масса ацетона (газ);

$M_{\text{в}} = 29 \text{ г/моль}$  (кг/кмоль) – средняя молярная масса воздуха.

$$M = 0,05 \cdot 58 + (1 - 0,05) \cdot 29 = 30,45 \text{ кг/кмоль} = 30,45 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}$$

Величина критического диаметра определена по формуле (3.15)

$$d_{кр} = \frac{70 \cdot 25 \cdot 10^{-3} \cdot 8,31 \cdot 298}{0,44 \cdot 1,02 \cdot 10^3 \cdot 30,45 \cdot 10^{-3}} = 0,0032 \text{ м} = 3,2 \text{ мм}$$

10. Величина безопасного экспериментального максимального зазора определена по формуле (3.16):

$$БЭМЗ = \frac{0,0032}{3} = 0,00107 \text{ м} = 1,07 \text{ мм}$$

\*\*Для приближенных расчетов в формуле (3.15) можно использовать значения  $C_p$  и  $\lambda$  для воздуха, а значение  $M$  – для горючего вещества.

$$d_{кр} = \frac{70 \cdot 25,9 \cdot 10^{-3} \cdot 8,31 \cdot 298}{0,44 \cdot 1,01 \cdot 10^3 \cdot 58 \cdot 10^{-3}} = 0,0017 \text{ м} = 1,7 \text{ мм}.$$

### 3.8 Минимальная энергия зажигания

*Минимальная энергия зажигания  $E_{min}$  - это наименьшее значение электрического разряда, способного воспламенить наиболее легко-воспламеняющуюся смесь горючего газа, пара или пыли с воздухом.*

Минимальная энергия зажигания - один из показателей пожарной опасности веществ, применяется при разработке мероприятий по пожаровзрывобезопасности и электростатической искробезопасности технологических процессов с обращающимися горючими газами, жидкостями и пылями. Эти мероприятия касаются выбора взрывобезопасного электрооборудования, материалов, условий их безопасной эксплуатации и т.д.

Минимальная энергия зажигания зависит от множества различных параметров. Она определяется экспериментально по [1], [2].

Минимальная энергия зажигания в курсовой работе определяется по справочной литературе и расчетом.

### 3.8.1 Способ №1

Приблизительно величину минимальной энергии зажигания можно рассчитать по формуле

$$W = 0,01 \cdot d_{кр}^{2,5}, \text{ мДж} \quad (3.20)$$

где  $d_{кр}$  – критический диаметр, мм.

**Пример 2.17** Рассчитать минимальную энергию зажигания паровоздушной смеси диэтилового эфира по формуле (3.20).

Решение:

Рассчитанная величина  $d_{кр}$  для диэтилового эфира  $d_{кр} = 3,2$  мм (пример 1.14).

$$W = 0,01 \cdot 3,2^{2,5} = 0,183 \text{ мДж}$$

### 3.8.2 Способ №2

Еще одним расчетным методом приближенной оценки минимальной энергии зажигания является расчет по формуле:

$$W = \frac{0,036}{(S_u)^2}, \text{ мДж} \quad (3.21)$$

**Пример 2.18.** Рассчитать минимальную энергию зажигания паровоздушной смеси диэтилового эфира по формуле (3.21).

Решение:

$$W = \frac{0,036}{(0,43)^2} = 0,195 \text{ мДж}.$$

### 3.8.3 Способ №3

Минимальная энергия зажигания  $W$  (Дж) может быть рассчитана по формуле:

$$W = \alpha \cdot q \cdot l_{кр}^3 \quad (3.22)$$

где:

$\alpha = 0,5$  – коэффициент пропорциональности;

$q$  – удельное объемное количество тепла, необходимое для нагрева горючей смеси от её начальной температуры  $t_n$  до температуры самовоспламенения. Дж/м<sup>3</sup>;

$l_k$  – величина критического зазора, м.

Удельное объемное количество тепла, необходимое для нагрева горючей смеси от  $t_{нач}$  до  $t_{св}$ , рассматривается как тепло, нужное для нагрева воздуха  $q_2$ , и вычисляется (Дж) по формуле:

$$q_2 = \int_{t_{нач}}^{t_{самовосп}} (C_p \cdot \rho_2) dt \quad (3.23)$$

где:

$C_p$  – теплоемкость воздуха, Дж/(кг град);

$\rho_2$  – плотность воздуха, кг/м<sup>3</sup>.

Величину  $q_2$  можно вычислить по таблице 14.

При расчете критического зазора зажигания  $l_k$  используется значения безопасного экспериментального максимального зазора (БЭМЗ):

$$l_{\kappa} = 2 \cdot \text{БЭМЗ} \quad (3.24)$$

Среднеквадратичная погрешность расчета велика и составляет 90%.

Таблица 14 – Теплоемкость воздуха в зависимости от температуры

Температура, °С	Теплоёмкость воздуха $C_p$ , кДж/(м <sup>3</sup> град)	Тепло $q$ , затрачиваемое на нагрев 1 м <sup>3</sup> воздуха от 20 °С, кДж
20	1,211	-
30	1,171	11,09
40	1,134	23,4
50	1,098	34,6
60	1,055	45,4
70	1,034	55,8
80	1,099	66,2
90	0,977	75,9
100	0,955	85,5
120	0,906	103,6
140	0,865	121,3
160	0,829	137,9
180	0,796	153,8
200	0,765	169,1
250	0,700	204,1
300	0,644	236,3

Температура, °С	Теплоёмкость воздуха $C_p$ , кДж/(м <sup>3</sup> град)	Тепло $q$ , затрачиваемое на нагрев 1 м <sup>3</sup> воздуха от 20 °С, кДж
350	0,600	266,3
400	0,560	294,3
500	0,501	344,4
600	0,450	384,4
700	0,411	430,5
800	0,380	468,5
900	0,353	503,8
1000	0,328	536,6
1100	0,308	567,4
1200	0,290	596,4

**Пример 2.19** Рассчитать минимальную энергию зажигания паровоздушной смеси диэтилового эфира.

Исходные данные:  $t_{\text{нач}} = 30^\circ\text{C}$ ,  $t_{\text{св}} = 180^\circ\text{C}$ ,

$$l_{\kappa} = 2 \cdot \text{БЭМЗ} = 2 \cdot 1,07 = 2,14$$

Решение:

Используя данные таблицы 14, находим:

при  $30^\circ\text{C}$   $q = 11,09$  кДж/м<sup>3</sup>;

при  $180^\circ\text{C}$   $q = 153,8$  кДж/м<sup>3</sup>.

$$q_2 = 153,8 - 11,09 = 142,71 \frac{\text{кДж}}{\text{м}^3} = 1,43 \cdot 10^5 \frac{\text{Дж}}{\text{м}^3}$$

Используя значения  $q_{\Gamma}$ ,  $l_{\kappa}$  определяем значение минимальной энергии зажигания паров диэтилового эфира при  $30^\circ\text{C}$ :

$$W = 0,5 \cdot 1,43 \cdot 10^5 \cdot (2,14 \cdot 10^{-3})^3 = 7,01 \cdot 10^{-4} \text{ Дж}$$

**Пример 2.20** Рассчитать минимальную энергию зажигания паровоздушной смеси керосина осветительного марки А.

Исходные данные:  $t_{\text{нач}} = 70^\circ\text{C}$ ,  $t_{\text{св}} = 238^\circ\text{C}$ ,  $l_k = 1,8 \text{ мм}$ .

Решение:

Используя данные таблицы 14, находим:

при  $70^\circ\text{C}$   $q = 55,8 \text{ кДж/м}^3$ ;

при  $238^\circ\text{C}$   $q = 195,8 \text{ кДж/м}^3$ .

$$q_e = 195,8 - 55,8 = 140 \text{ кДж/м}^3 = 1,40 \cdot 10^5 \text{ Дж/м}^3$$

Используя значения  $q_g$ ,  $l_k$  определяем значение минимальной энергии зажигания паров керосина при  $70^\circ\text{C}$ :

$$W = 0,5 \cdot 1,4 \cdot 10^5 \cdot (1,8 \cdot 10^{-3})^3 = 4,1 \cdot 10^{-4} \text{ Дж}$$

### **3.9 Способность гореть и взрываться при взаимодействии с водой, кислородом и другими веществами**

Способность взрываться и гореть при взаимодействии с водой, кислородом воздуха и другими веществами — это качественный показатель, характеризующий особую пожарную опасность некоторых веществ.

Данные о способности веществ взрываться и гореть при взаимном контакте необходимо включать в стандарты или технические условия на вещества, а также следует применять при определении катего-

рии помещений по взрывопожарной и пожарной опасности в соответствии с требованиями норм технологического проектирования; при выборе безопасных условий проведения технологических процессов и условий совместного хранения и транспортирования веществ и материалов; при выборе или назначении средств пожаротушения.

Определяется по справочной литературе.

### **3.10 Минимальная флегматизирующая концентрация флегматизатора и минимальное взрывоопасное содержание кислорода**

**Минимальная флегматизирующая концентрация флегматизатора (МФКФ)** – наименьшая концентрация флегматизатора в смеси с горючим и окислителем, при которой смесь становится неспособной к распространению пламени при любом соотношении горючего и окислителя.

Значение минимальной флегматизирующей концентрации флегматизатора следует применять при разработке мероприятий по обеспечению пожаровзрывобезопасности технологических процессов методом флегматизации в соответствии с требованиями [1] и [3].

Сущность метода определения минимальной флегматизирующей концентрации флегматизатора заключается в определении концентрационных пределов распространения пламени горючего вещества при разбавлении газо-, паро- и пылевоздушной смеси данным флегматизатором и получении “кривой флегматизации”. Пик “кривой флегматизации” соответствует значению минимальной флегматизирующей концентрации флегматизатора.

Область воспламенения горючей смеси сужается при введении негорючих компонентов. Изменение концентрационных пределов воспламенения зависит от природы и концентрации негорючего вещества, используемого в качестве флегматизатора.

При некоторой определённой для флегматизатора концентрации нижний и верхний концентрационные пределы воспламенения сливаются. Эта точка называется экстремальной точкой области воспламенения или точкой флегматизации. В данной точке систему можно характеризовать

- концентрацией горючего компонента смеси,
- концентрацией флегматизатора в ней и
- концентрацией кислорода.

В пожарно - технической литературе для смеси такого состава введены соответствующие обозначения и определения:

$\Phi_{гф}$  - концентрация горючего в экстремальной точке области воспламенения, объемные проценты;

$\mu_{гф}$  – то же, но в нормальных долях, моль/моль;

$\Phi_{ф}$  - минимальная флегматизирующая концентрация негорючего компонента, объемные проценты;

$\mu_{ф}$  - мольная доля флегматизатора в смеси;

$\Phi_{кис(ф)}$  – минимальное взрывоопасное содержание кислорода в воздухе в точке флегматизации, (объемные проценты);

Концентрация флегматизатора в экстремальной точке рассчитывается по формуле:

$$\Phi_{ф} = 100 \cdot \frac{h_f^* \cdot \Delta H_f^0 + h_{ф}^* + \sum_{j=1}^n h_j^* \cdot m_j}{h_{ф}^{**} - 1 + \sum_{j=1}^n h_j^{**} \cdot m_j} \quad (3.25)$$

где:

$h'$  и  $h''$  - параметры, зависят от рода флегматизатора, приведены в таблице 15,

$\Delta H_f^0$  – энтальпия образования горючего, причём, если параметры  $h$  даны в моль/Дж, то и  $\Delta H_f^0$  – необходимо брать в Дж/моль; индексом  $m_j$  в формуле обозначено число атомов и групп одного вида в молекуле горючего.

Таблица 15 – Параметры, зависящие от вида флегматизатора

Параметры (моль/Дж)	Значение параметров при разбавлении смеси:		
	азотом	водяным паром	двуокисью углерода
$h_f^1$	$0,864 \cdot 10^{-5}$	$0,800 \cdot 10^{-5}$	$0,735 \cdot 10^{-5}$
$h_\phi^1$	1,256	0,780	0,579
$h_C^1$	2,5277	1,651	1,251
$h_H^1$	0,7592	0,527	0,418
$h_O^1$	0,197	0,446	0,542
$h_N^1$	-0,151	-0,147	-0,135
$h_{C=C}^1$	1,500	1,500	1,500
$h_\phi^{11}$	2,800	2,236	2,020
$h_C^{11}$	5,946	5,000	4,642
$h_H^{11}$	1,486	1,250	1,160
$h_O^{11}$	-2,973	-2,500	-2,321
$h_{C=C}^{11}$	0	0	0

Параметры	Значение параметров при разбавлении смеси:		
$h_N^{11}$	0	0	0

**Пример 2.21** Вычислить минимальную флегматизирующую концентрацию флегматизатора для этилового спирта.

$$\Delta H_f^0(\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}) = -234,9 \text{ кДж/моль} = -234900 \text{ Дж/моль}.$$

Решение:

В расчете необходимо определить минимальную флегматизирующую концентрацию для водяного пара,  $\text{CO}_2$  и  $\text{N}_2$ .

$$m_c = 2, m_h = 6, m_o = 1.$$

**Разбавление азотом:**

$$\varphi_\phi = 100 \cdot \frac{0,864 \cdot 10^{-5} \cdot (-234900) + 1,256 + (2,5277 \cdot 2 + 0,7592 \cdot 6 + 0,197 \cdot 1)}{2,800 - 1 + (5,946 \cdot 2 + 1,486 \cdot 6 - 2,973 \cdot 1)} = 46\%$$

**Разбавление водяным паром:**

$$\varphi_\phi = 100 \cdot \frac{0,800 \cdot 10^{-5} \cdot (-234900) + 0,780 + (1,651 \cdot 2 + 0,527 \cdot 6 + 0,446 \cdot 1)}{2,236 - 1 + (5,000 \cdot 2 + 1,250 \cdot 6 - 2,500)} = 35,7\%$$

**Разбавление двуокисью углерода:**

$$\varphi_\phi = 100 \cdot \frac{0,735 \cdot 10^{-5} \cdot (-234900) + 0,579 + (1,251 \cdot 2 + 0,418 \cdot 6 + 0,542 \cdot 1)}{2,020 - 1 + (4,642 \cdot 2 + 1,160 \cdot 6 - 2,321)} = 27,8\%$$

### 3.10.1 Минимальная флегматизирующая концентрация газовых средств пожаротушения $C_{МФК}$ , % (об)

Минимальную флегматизирующую концентрацию газовых средств пожаротушения  $C_{МФК}$ , % (об), вычисляют по формуле:

$$C_{МФК} = \frac{100 \cdot F}{F + \gamma \cdot \left( 1 + \frac{C_{O_2}}{100 \cdot \beta_{CO}} \right)} \quad (3.26)$$

где:

$\gamma$  – эмпирический безразмерный параметр, значения которого приведены в таблице 16;

$C_{O_2}$  – концентрация кислорода в воздухе, % (об);

$\beta_{CO}$  – стехиометрический коэффициент кислорода в реакции сгорания до CO и  $H_2O$ . Величину  $\beta_{CO}$  – вычисляют по формуле:

$$\beta_{CO} = 0,5n_C + 0,25n_H - 0,5n_O$$

где:

$\beta_{CO}$ ,  $n_H$ ,  $n_O$  – число атомов С, Н, О в молекуле горючего;

F – безразмерная функция, которую вычисляют по формуле:

$$F = \frac{C_{O_2}}{100 \cdot \beta_{O_2}} \cdot (h_C \cdot n_C + h_H \cdot n_H + h_O \cdot n_O + h_N \cdot n_N + h_f \cdot \Delta H_f^0) - 1 \quad (3.27)$$

где:

$h_C = 2,373$ ;  $h_H = 2,757$ ;  $h_O = -0,522$ ,  $h_N = -0,494$ ,  $h_f = 2,58 \cdot 10^{-2}$  кДж/моль;

$\Delta H_f^0$  – стандартная теплота образования горючего вещества, кДж/моль.

Таблица 16 - Значения коэффициента  $\gamma$  для различных флегматизаторов

Флегматизатор	$\gamma$	Флегматизатор	$\gamma$
N <sub>2</sub>	1,0	CFCl <sub>3</sub>	4,0
CO <sub>2</sub>	1,6	CCl <sub>4</sub>	4,8
H <sub>2</sub> O	1,2	C <sub>2</sub> F <sub>4</sub> Cl <sub>2</sub>	6,0
C <sub>2</sub> F <sub>3</sub> Cl <sub>3</sub>	5,6	C <sub>2</sub> F <sub>5</sub> Cl	6,0
C <sub>2</sub> F <sub>4</sub> Br <sub>2</sub>	21,3	C <sub>4</sub> F <sub>10</sub>	4,3
SF <sub>6</sub>	3,9	C <sub>2</sub> F <sub>5</sub> I	5,6
CF <sub>2</sub> ClH	3,3	CF <sub>3</sub> H	1,6
CF <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub>	4,5	C <sub>3</sub> F <sub>7</sub> H	3,0
C <sub>3</sub> F <sub>8</sub>	6,1	C <sub>4</sub> F <sub>8</sub>	2,7
CF <sub>4</sub>	2,4	C <sub>2</sub> F <sub>5</sub> H	2,5
CF <sub>3</sub> Br	16,2	CF <sub>3</sub> I	15,5

**Пример 2.22.** Рассчитать концентрацию флегматизатора в экстремальной точке области распространения пламени при флегматизации этанола азотом (N<sub>2</sub>), углекислым газом (CO<sub>2</sub>), парами воды (H<sub>2</sub>O) и перфторбутаном (C<sub>4</sub>F<sub>10</sub>). Стандартная энтальпия образования этанола  $\Delta H_f^0(\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}) = -234,9$  кДж/моль.

Решение:

$$\Delta H_f^0 \text{ Для этанола: } m_C = 2, m_H = 6, m_O = 1$$

$$\beta_{\text{CO}} = 0,5 \cdot 2 + 0,25 \cdot 6 - 0,5 \cdot 1 = 2,0$$

$$F = \frac{21}{100 \cdot 2} \cdot (2,373 \cdot 2 + 2,757 \cdot 6 + (-0,552) \cdot 1 + 2,58 \cdot 10^{-2} \cdot (-234,9)) - 1 = 0,544$$

Флегматизатор : азот  $\text{N}_2$ .  $\gamma = 1,0$  (таблица 16)

$$C_{\text{МФК}} = \frac{100 \cdot 0,544}{0,544 + 1 \left(1 + \frac{21}{100 \cdot 2}\right)} = 33 \%$$

Флегматизатор : углекислый газ  $\text{CO}_2$ .  $\gamma = 1,6$  (таблица 16)

$$C_{\text{МФК}} = \frac{100 \cdot 0,544}{0,544 + 1,6 \left(1 + \frac{21}{100 \cdot 2}\right)} = 23,5 \%$$

Флегматизатор : пары воды  $\text{H}_2\text{O}$ .  $\gamma = 1,2$  (таблица 16)

$$C_{\text{МФК}} = \frac{100 \cdot 0,544}{0,544 + 1,2 \left(1 + \frac{21}{100 \cdot 2}\right)} = 29,1 \%$$

Флегматизатор : перфторбутан  $\text{C}_4\text{F}_{10}$ .  $\gamma = 4,3$  (таблица 16)

$$C_{\text{МФК}} = \frac{100 \cdot 0,544}{0,544 + 4,3 \left(1 + \frac{21}{100 \cdot 2}\right)} = 10,3 \%$$

### 3.10.2 Концентрация горючего в смеси (в %) соответствующей по составу точке флегматизации

Концентрация горючего в смеси (в %) соответствующей по составу точке флегматизации  $C_{ГФ}$ , вычисляются по формуле:

$$C_{ГФ} = \frac{100 - C_{МФК}}{1 + \beta_{CO} \cdot \frac{100}{C_{O_2}}} \quad (3.28)$$

**Пример 2.23** Рассчитать концентрацию паров этанола  $C_2H_5OH$  в смеси, соответствующей по составу точке флегматизации при флегматизации этанола азотом ( $N_2$ ), углекислым газом ( $CO_2$ ), парами воды ( $H_2O$ ) и перфторбутаном ( $C_4F_{10}$ ).

Решение:

Флегматизатор: **азот  $N_2$** .  $C_{МФК} = 33,0 \%$

$$C_{ГФ} = \frac{100 - 33}{1 + 2 \cdot \frac{100}{21}} = 6,4 \%$$

Флегматизатор: **углекислый газ  $CO_2$** .  $C_{МФК} = 23,5 \%$

$$C_{ГФ} = \frac{100 - 23,5}{1 + 2 \cdot \frac{100}{21}} = 7,3 \%$$

Флегматизатор: **пары воды  $H_2O$** .  $C_{МФК} = 29,1 \%$

$$C_{ГФ} = \frac{100 - 29,1}{1 + 2 \cdot \frac{100}{21}} = 6,7 \%$$

Флегматизатор: перфторбутан  $C_4F_{10}$ .  $C_{МФК} = 10,3 \%$

$$C_{ГФ} = \frac{100 - 10,3}{1 + 2 \cdot \frac{100}{21}} = 8,5 \%$$

### 3.11 Минимальное взрывоопасное содержание кислорода

*Минимальное взрывоопасное содержание кислорода (МВСК) – такая концентрация кислорода в горючей смеси, состоящей из горючего вещества, воздуха и флегматизатора, меньше которой распространение пламени в смеси становится невозможным при любой концентрации горючего в смеси, разбавленной данным флегматизатором.*

Значение минимального взрывоопасного содержания кислорода применяется при разработке мероприятий по обеспечению пожаро-взрывобезопасности технологических процессов.

Минимальное взрывоопасное содержание кислорода (МВСК) в объемных процентах рассчитывается по формуле:

$$МВСК = (100 - C_{МФК} - C_{ГФ}) \cdot \frac{C_{O_2}}{100}, \% \quad (3.29)$$

Относительная средняя квадратичная погрешность расчета не превышает 10%.

**Пример 2.24** Рассчитать МВСК в смеси, соответствующей по составу точке флегматизации при флегматизации этанола

$C_2H_5OH$  азотом ( $N_2$ ), углекислым газом ( $CO_2$ ), парами воды ( $H_2O$ ) и перфторбутаном ( $C_4F_{10}$ ).

Флегматизатор: **азот  $N_2$** .  $C_{MФК} = 33,0 \%$ ;  $C_{ГФ} = 6,4 \%$

$$MВСК = (100 - 33 - 6,4) \cdot \frac{21}{100} = 12,7 \%$$

Флегматизатор: **углекислый газ  $CO_2$** .  $C_{MФК} = 23,5 \%$ ;  $C_{ГФ} = 7,3 \%$

$$MВСК = (100 - 23,5 - 7,3) \cdot \frac{21}{100} = 14,5 \%$$

Флегматизатор: **пары воды  $H_2O$** .  $C_{MФК} = 29,1 \%$ ;  $C_{ГФ} = 6,7 \%$

$$MВСК = (100 - 29,1 - 6,7) \cdot \frac{21}{100} = 13,5 \%$$

Флегматизатор: **перфторбутан  $C_4F_{10}$** .  $C_{MФК} = 10,3 \%$ ;  $C_{ГФ} = 8,5 \%$

$$MВСК = (100 - 10,3 - 8,5) \cdot \frac{21}{100} = 17,1 \%$$

### 3.11.1 Расчет минимальной огнетушащей концентрации газовых средств пожаротушения ( $C_{МОК}$ , % (об))

Метод расчета минимальных огнетушащих концентраций газовых средств пожаротушения распространяется на горючие вещества, состоящие из С, Н, О, N.

$$C_{МОК} = \alpha \cdot C_{мфк} \quad (3.30)$$

где

$\alpha = 0,47$  (безразмерный коэффициент);

$C_{мфк}$  – минимальная флегматизирующая концентрация флегматизатора, % (об)

**Пример 2.25** Рассчитать значение минимальной огнетушащей концентрации азота ( $N_2$ ), углекислого газа ( $CO_2$ ), паров воды ( $H_2O$ ) и перфторбутана ( $C_4F_{10}$ ) для тушения паров этанола  $C_2H_5OH$ .

Флегматизатор: **азот  $N_2$** .  $C_{мфк} = 33,0 \%$

$$C_{МОК} = 0,47 \cdot 33 = 15,5 \%$$

Флегматизатор: **углекислый газ  $CO_2$** .  $C_{мфк} = 23,5 \%$

$$C_{МОК} = 0,47 \cdot 23,5 = 11,0 \%$$

Флегматизатор: **пары воды  $H_2O$** .  $C_{мфк} = 29,1 \%$

$$C_{МОК} = 0,47 \cdot 29,1 = 13,7 \%$$

Флегматизатор: **перфторбутан  $C_4F_{10}$** .  $C_{мфк} = 10,3 \%$

$$C_{МОК} = 0,47 \cdot 10,3 = 4,8 \%$$

### 3.12 Максимальное давление взрыва

*Максимальное давление взрыва – наибольшее избыточное давление, возникающее при дефлаграционном сгорании газо-, паро- или пы-*

левоздушной смеси в замкнутом сосуде при начальном давлении смеси 101,3 кПа.

Максимальное давление взрыва определяется экспериментально и расчетными методами. Методика расчета регламентируется [1] [2].

Метод расчета максимального давления взрыва газо- и паровоздушных смесей распространяется на вещества, состоящие из атомов С, Н, О, N, S, F, Cl, Вг, Р, Si.

Максимальное давление взрыва  $p_{\max}$  без учета степени диссоциации продуктов горения в кПа вычисляют по формуле:

$$P_{\max} = \frac{P_0 \cdot T_{\text{ад}}}{T_0} \cdot \frac{m}{n}, \quad (3.31)$$

где:

$P_0$  - начальное давление, при котором находится исходная смесь, кПа;

$T_{\text{ад}}$  - адиабатическая температура горения стехиометрической смеси горючего с воздухом при постоянном объеме, К ;

$m$  - сумма числа молей конечных продуктов горения;

$T_0$  - температура исходной смеси. К;

$n$  - сумма числа молей газообразных исходных веществ.

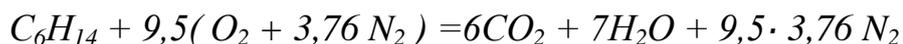
Относительная средняя квадратичная погрешность расчета по данной методике составляет 30 %.

**Пример 2.26** Вычислить максимальное давление взрыва смеси гексана  $C_6H_{14}$  с воздухом, если начальное давление 101,3 кПа, началь-

ная температура 273 К, температура взрыва (адиабатическая температура горения) 2355 К.

Решение:

1. Уравнение реакции горения гексана в воздухе:



2. Рассчитаем число молей (киломолей) газообразных веществ до и после взрыва:

до взрыва:

$$n = 1 + 9,5 \cdot 4,76 = 46,22 \text{ моль}$$

после взрыва:

$$m = 6 + 7 + 9,5 \cdot 3,76 = 48,72 \text{ моль}$$

3. Максимальное давление взрыва составит:

$$P_{\max} = \frac{101,3 \cdot 2355}{273} \cdot \frac{48,72}{46,22} = 921,1 \text{ кПа}$$

### 3.13 Выводы и рекомендации

В данной главе необходимо произвести анализ пожарной опасности вещества, определить безопасные режимы работы и дать рекомендации по работе с ним.

Для обеспечения пожаровзрывобезопасности процессов производства, переработки, хранения и транспортирования веществ и материалов необходимо данные о показателях пожаровзрывоопасности веществ и материалов использовать с коэффициентами безопасности, приведенными в таблице 17.

Таблица 17 – Условия пожаровзрывобезопасности

Способ предотвращения пожара, взрыва	Регламентируемый параметр	Условия пожаровзрывобезопасности
Предотвращение образования горючей среды	$\varphi_{г, без}$	$\varphi_{г, без} \leq 0,9 (\varphi_{н} - 0,7 R)$
		$\varphi_{г, без} \geq 1,1 (\varphi_{в} + 0,7 R)$
	$\varphi_{ф, без}$	$\varphi_{ф, без} \geq 1,1 (\varphi_{ф} + 0,7 R)$
	$\varphi_{O_2, без}$	$\varphi_{O_2, без} \leq 0,9 (\varphi_{O_2} - 0,7 D)$
Ограничение воспламеняемости и горючести веществ и материалов	Горючесть вещества (материала)	Горючесть вещества (материала) не должна быть более регламентированной
	$КИ_{д}$	$КИ_{д} \leq КИ$
	$t_{всп,д}$	$t_{всп,д} \leq t_{всп(з.т.)} - 35^{\circ}C$
Предотвращение образования в горючей среде (или внесения в нее) источников зажигания	$W_{без}$	$W_{без} \leq 0,4 W_{мин}$ $t_{без} \leq 0,8 t_{тл}$ $t_{без} \leq 0,8 t_c$

$KI$ —кислородный индекс, % об.;

$KИд$ —допустимый кислородный индекс при нормальной температуре, % об.;

$R$ — воспроизводимость метода определения показателя пожарной опасности при доверительной вероятности 95%;

$t_{\text{без}}$  — безопасная температура, °С;

$t_{\text{всп,д}}$  — допустимая температура вспышки, °С;

$t_{\text{всп(з.т.)}}$  — температура вспышки в закрытом тигле, °С.;

$t_c$ —минимальная температура среды, при которой наблюдается самовозгорание образца, °С;

$t_{\text{тл}}$  — температура тления, °С;

$W_{\text{без}}$  — безопасная энергия зажигания, Дж;

$W_{\text{мин}}$  — минимальная энергия зажигания, Дж;

$\varphi_{\text{в}}$  — верхний концентрационный предел распространения пламени по смеси горючего вещества с воздухом, % об. ( $\text{г} \cdot \text{м}^{-3}$ );

$\varphi_{\text{г,без}}$  — безопасная концентрация горючего вещества, % об. ( $\text{г} \cdot \text{м}^{-3}$ );

$\varphi_{\text{н}}$  — нижний концентрационный предел распространения пламени по смеси горючего вещества с воздухом, % об. ( $\text{г} \cdot \text{м}^{-3}$ );

$\varphi_{\text{O}_2}$  — минимальное взрывоопасное содержание кислорода в горючей смеси, % об.;

$\varphi_{\text{O}_2, \text{без}}$  — безопасная концентрация кислорода в горючей смеси, % об.;

$\varphi_{\text{ф}}$  — минимальная флегматизирующая концентрация флегматизатора, % об.;

$\varphi_{\text{ф,без}}$  — безопасная флегматизирующая концентрация флегматизатора, % об.

Показатели пожаровзрывоопасности в той или иной мере зависят от параметров состояния системы, в которой находятся вещества. Даже такое фундаментальное свойство, как горючесть, зависит от

температуры, давления и концентрации окислителя в среде, от размера и формы образца, скорости движения среды, направления распространения пламени и других факторов.

Вещество, негорючее в одних условиях, может оказаться трудногорючим в других и даже горючим в третьих. Значения параметров состояния, при которых вещество становится горючим, называются пожароопасными.

Основные пожаровзрывобезопасные значения параметров состояния веществ и материалов проистекают из их показателей пожарной опасности.

**Температура вспышки** является экспресс параметром для ориентировочной оценки температурных условий, при которых горючее вещество становится пожароопасным в закрытом сосуде или при разливе. Допустимой для жидкости принимается температура, равная:

$$t_{\text{без}} < t_{\text{всп(зт)}} - 35 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

**Температура самовоспламенения** применяется для оценки безопасной температуры нагрева неизолированных поверхностей оборудования, при разработке мер пожарной безопасности для технологических процессов, при определении группы взрывоопасной смеси по [4] .

Безопасная температура нагрева неизолированных поверхностей технологического, электро- или другого оборудования должна быть меньше температуры самовоспламенения на 20 %:

$$t_{\text{без}} < 0,8 \cdot t_{\text{св}}.$$

**Область воспламенения** - область концентраций данного вещества между НКПР и ВКПР. Значениями КПР пользуются при расчете взрывобезопасных концентраций газов, паров и пылей внутри технологического оборудования, трубопроводов, при проектировании вен-

тиляционных систем, а также при расчетах предельно допустимых, взрывобезопасных концентраций газов, паров и пылей в воздухе рабочей зоны с потенциальными источниками зажигания в соответствии с [3].

Согласно [1] взрывобезопасными будут концентрации горючего вещества:

$$\varphi_{\text{без}} \leq \varphi_{\text{н}} \quad \text{и} \quad \varphi_{\text{без}} \geq \varphi_{\text{в}}.$$

К взрывобезопасным можно отнести также концентрации вещества, рассчитанные по формуле:

$$\varphi_{\text{без}} = \varphi_{\text{н}} / K_{\text{без}},$$

где:

коэффициент безопасности  $K_{\text{без}}$  рассчитывается по [1] или принимается по нормативным документам

#### ***Однородная газовая смесь.***

Без источника зажигания (газовая фаза в закрытых технологических аппаратах без продувки их воздухом, азотом и др. газами) - 2

С источником зажигания (закрытые технологические аппараты) - 4

#### ***Неоднородная газовая смесь***

Без источника зажигания(газовая фаза в продуваемых воздухом, азотом или другими газами закрытых технологических аппаратах; газовая фаза в открытых технологических аппаратах; воздушная среда цехов, взрывоопасных по газу или пару) - 10

С источниками зажигания(воздушная среда производственных помещений и открытых технологических аппаратов) - 20

Взрывобезопасность среды можно обеспечить, не только изменяя концентрацию горючего или окислителя, но и добавляя определенное количество флегматизатора. Следует отметить, что обеспечение

взрывобезопасности внутри аппаратуры при нормальном технологическом режиме не дает оснований считать данное оборудование взрывобезопасным.

**Температурные пределы распространения пламени (воспламенения)** применяются при расчете пожаровзрывобезопасных температурных режимов работы технологического оборудования, (включаются в стандарты и технические условия на горючие жидкости), при оценке пожарной опасности оборудования и технологических процессов, аварийных ситуаций, связанных с разливом горючих жидкостей и для расчета КПП. За безопасную температуру нагрева жидкости принимается температура, равная:

$$t_{\text{без}} \leq \text{НТПР} - 15 \text{ }^\circ\text{C} \quad \text{и} \quad t_{\text{без}} \geq \text{ВТПР} + 15 \text{ }^\circ\text{C}.$$

**Температура тления** применяется при экспертизах пожаров, при выборе взрывозащищенного электрооборудования и в ряде других случаев. Безопасной принимается температура нагрева вещества, равная:

$$t_{\text{без}} \leq 0,8 t_{\text{тл}}.$$

**Условия теплового самовозгорания** применяются при выборе безопасных условий переработки, транспортировки и хранения самовозгорающихся веществ. Безопасной принимается температура вещества, равная:

$$t_{\text{без}} < 0,8 t_c.$$

**Минимальная энергия зажигания** применяется при выборе пожаровзрывобезопасных условий переработки горючих веществ и

электростатической искробезопасности технологических процессов.

Безопасными считаются источники зажигания с энергией

$$W_{\text{без}} < 0,4W_{\text{мин}}, \text{ мДж.}$$

## **4 РАСЧЕТ ОПАСНЫХ ФАКТОРОВ ПРИ РЕАЛИЗАЦИИ АВАРИЙНОЙ СИТУАЦИИ**

Опасные факторы пожара [5], реализуемые при различных сценариях пожаров, определяется в соответствии с Приложением к приказу МЧС России от 10 июля 2009 года № 404 в редакции приказа МЧС России от 14 декабря 2010 года Методика определения расчетных величин пожарного риска на производственных объектах (далее Методика) и в соответствии с [6].

При проведении расчетов в курсовой работе кроме вышеизложенных документов и настоящего учебного пособия рекомендуется использовать Пособие по определению расчетных величин пожарного риска для производственных объектов.

В настоящем учебном пособии приведены алгоритм и примеры расчета опасных факторов пожара, реализуемых при аварийных ситуациях.

### **4.1 Расчет опасных факторов при аварийной ситуации технологической площадке**

В курсовой работе моделируется аварийная ситуация связанная с разгерметизацией наружной установки. Схема производственного участка приведена на рисунках 1 и 2. В каждом варианте курсовой работы вид жидкостей, объем аппаратов индивидуальные. Курсантам необходимо определить количественные значения опасных факторов пожаров (ОФП) на расстояниях от резервуара 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100 м. Для каждого опасного фактора пожара необходимо построить графики их зависимости от расстояния [7].

Основные показатели пожарной опасности для расчетов принимаются по данным второго раздела настоящей курсовой работы. Основные физико-химические свойства вещества по справочным данным.

Климатические характеристики региона, в котором расположен объект (максимальная температура воздуха и скорость воздушного потока), определяются по [8].

Параметры опасных факторов пожара зависят в первую очередь от вида и количества горючих веществ, участвующих в пожаре и взрыве. Из курсов химии (темы – расчеты по уравнениям химических реакций, химическая термодинамика) и теории горения и взрыва (темы – материальный и тепловой баланс процесса горения) известно, что количество продуктов сгорания и количество выделившейся теплоты зависит именно от количества горючего участвующего во взрыве.

В соответствии с [9] (приложение II, п.6) количество поступивших в окружающее пространство горючих веществ, которые могут образовать взрывоопасные газопаровоздушные смеси или проливы горючих сжиженных газов, легковоспламеняющихся и горючих жидкостей на подстилающей поверхности, определяется, исходя из следующих предпосылок:

а) происходит расчетная авария одного из резервуаров (аппаратов);

б) все содержимое резервуара поступает в окружающее пространство;

в) при разгерметизации резервуара (аппарата) происходит одновременно утечка веществ из трубопроводов, питающих резервуар по прямому и обратному потоку в течение времени, необходимого для отключения трубопроводов. Расчетное время отключения трубопроводов определяется в каждом конкретном случае, исходя из реальной обста-

новки, и должно быть минимальным с учетом паспортных данных на запорные устройства и их надежности, характера технологического процесса и вида расчетной аварии.

При отсутствии данных допускается расчетное время отключения технологических трубопроводов принимать равным:

времени срабатывания системы автоматики отключения трубопроводов согласно паспортным данным установки, если вероятность отказа системы автоматики не превышает 0,000001 в год или обеспечено резервирование ее элементов;

120 с, если вероятность отказа системы автоматики превышает 0,000001 в год и не обеспечено резервирование ее элементов;

300 с при ручном отключении;

г) в качестве расчетной температуры при пожароопасной ситуации с наземно расположенным оборудованием допускается принимать максимально возможную температуру воздуха в соответствующей климатической зоне (определяется по СП 131.13330 «Строительная климатология»), а при пожароопасной ситуации с подземно расположенным оборудованием - температуру грунта, условно равную максимальной среднемесячной температуре окружающего воздуха в наиболее теплое время года (определяется по СП 131.13330 «Строительная климатология»);

е) длительность испарения жидкости с поверхности пролива принимается равной времени ее полного испарения, но не более 3600 с. Для проливов жидкости до 20 кг время испарения допускается принимать равным 900 с.

Допускается использование показателей пожаровзрывоопасности для смесей веществ и материалов по наиболее опасному компоненту.

Выход горючего вещества зависит от вида разгерметизированного оборудования, поэтому в Методике методы определения массы, поступивших в пространство определено для различного оборудования.

#### **4.1.1 Определение массы жидкости поступившей в окружающее пространство при аварии**

Масса жидкости, поступившей в окружающее пространство при разгерметизации резервуара, определяется по формуле:

$$m_a = \rho_L \cdot V_R \quad (4.1)$$

где  $m_a$  - масса жидкости, кг;

$\rho_L$  - плотность жидкости, кг/м<sup>3</sup>;

$V_R$  - объем жидкости в резервуаре, м<sup>3</sup>.

В соответствии с п. 6 пп. б Методики, при аварийной ситуации все содержимое резервуара поступает в окружающее пространство, поэтому расчет ведется без учета массы жидкости самотеком.

При проливе на неограниченную поверхность площадь пролива  $F_{ПР}$  (м<sup>2</sup>) жидкости определяется по формуле:

$$F_{ПР} = f_p \cdot V_{ж} \quad (4.2)$$

где  $f_p$  - коэффициент разлития, м<sup>-1</sup> (при отсутствии данных допускается принимать равным 5 м<sup>-1</sup> при проливе на неспланированную грунтовую поверхность, 20 м<sup>-1</sup> при проливе на спланированное грунтовое покрытие, 150 м<sup>-1</sup> при проливе на бетонное или асфальтовое покрытие);

$V_{ж}$  - объем жидкости, поступившей в окружающее пространство при разгерметизации резервуара, м<sup>3</sup>.

После определения массы жидкости, вышедшей в результате аварии, необходимо определить массу паров, которая будет участвовать в горении. Из дисциплины теория горения и взрыва известно, что горит не жидкость, а ее пары.

### 3.1.2 Масса паров ЛВЖ, участвующей во взрыве

Масса паров ЛВЖ при испарении со свободной поверхности в резервуаре определяется по формуле:

$$m_n = G_v \cdot \tau_E \quad (4.3)$$

где  $G_v$  - расход паров ЛВЖ, кг/с, который определяется по формуле:

$$G_v = F_{\text{пр}} \cdot W \quad (4.4)$$

где  $\tau_E$  - время поступления паров из резервуара, с;

$F_{\text{пр}}$  - максимальная площадь поверхности испарения ЛВЖ (площадь пролива),  $\text{м}^2$ ;

$W$  - интенсивность испарения ЛВЖ,  $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ .

Интенсивность испарения  $W$  ( $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ ) для ненагретых жидкостей с определяется по формуле:

$$W = 10^{-6} \cdot \eta \cdot \sqrt{M} \cdot P_s \quad (4.5)$$

где  $\eta$  - коэффициент, принимаемый для помещений по таблице 18 в зависимости от скорости и температуры воздушного потока над поверхностью испарения. При проливе жидкости вне помещения допускается принимать  $\eta = 1$ ;

$M$  - молярная масса жидкости,  $\text{кг}/\text{кмоль}$ ;

Таблица 18 - Определение коэффициента  $\eta$

Скорость воздушного потока, м/с	Значение коэффициента $\eta$ при температуре $t$ ( $^{\circ}\text{C}$ ) воздуха				
	10	15	20	30	35
0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
0,1	3,0	2,6	2,4	1,8	1,6
0,2	4,6	3,8	3,5	2,4	2,3
0,5	6,6	5,7	5,4	3,6	3,2
1,0	10,0	8,7	7,7	5,6	4,6

$P_s$  - давление насыщенного пара при расчетной температуре жидкости, кПа.

Давление насыщенного пара при расчетной температуре ( $P_s$ ) определяется по уравнению Антуана:

$$P_s = 10,0^{\frac{A-B}{C+t_p}} ; \text{ кПа}, \quad (4.6)$$

где  $t_p$  - расчетная температура  $^{\circ}\text{C}$ ;

$A, B, C$  – константы Антуана, приведенные в справочной литературе. Следует учесть, что справочной литературе [7] константы уравнения Антуана могут быть заданы для *различных размерностей давления*.

Из курсов химии и физико-химические основы развития и тушения пожаров известно, что при кипении давления насыщенного пара будет равно атмосферному давлению, следовательно, для проверки размерности необходимо в уравнение Антуана вместо расчетной температуры подставить температуру кипения, рассматриваемой жидкости. Если при этой подстановке полученное давление будет близко по значению к 100, то значит константы Антуана заданы для кПа, если значение будет близко к 760 – значит для мм.рт.ст.).

После определения массы жидкости вышедшей из резервуара и массы паров, которая образуется в результате испарения необходимо определить максимальные размеры взрывоопасной зоны. Из дисциплины физико-химические основы развития и тушения пожаров, что пожаровзрывоопасной зоной считается зона, где концентрация паров или газов в смеси горючего с окислителем более нижнего концентрационного предела распространения пламени (НКПР).

#### 4.1.2 Максимальные размеры взрывоопасных зон

Радиус  $R_{НКПР}$  (м) и высота  $Z_{НКПР}$  (м) зоны, ограничивающие область концентраций, превышающих нижний концентрационный предел распространения пламени (далее - НКПР), при неподвижной воздушной среде для паров ЛВЖ определяется по формулам:

$$R_{НКПР} = 7,8 \cdot \left( \frac{m_n}{\rho_n \cdot C_{НКПР}} \right)^{0,33}, \quad (4.7)$$

$$Z_{НКПР} = 0,26 \cdot \left( \frac{m_{22}}{\rho_n \cdot C_{НКПР}} \right)^{0,33}. \quad (4.8)$$

$m_{П}$  - масса паров ЛВЖ, поступивших в открытое пространство за время испарения, кг;  $C_{НКПР}$  - нижний концентрационный предел распространения пламени паров, % об (концентрационные пределы распространения пламени определены в п.3.4 настоящей курсовой работы);

$\rho_{П}$  - плотность паров ЛВЖ при расчетной температуре, кг/м<sup>3</sup>.

$$\rho_{г.п.} = \frac{M}{V_0 \cdot (1 + 0,00367 \cdot t_p)} \quad (4.9)$$

Где:

$M$ - молярная масса, кг/кмоль;

$V_0$  -мольный объем, равный  $22,413 \text{ м}^3 \cdot \text{кмоль}^{-1}$ ;

$t_p$  -расчетная температура, °С.

За начало отсчета горизонтального размера зоны принимают геометрический центр пролива, а в случае, если  $R_{\text{НКПР}}$  меньше габаритных размеров пролива, – внешние габаритные размеры пролива.

При необходимости может быть учтено влияние различных метеорологических условий на размеры взрывоопасных зон.

После определения области ограниченной НКПР, требуется определить параметры волны давления при сгорании образовавшегося паровоздушного облака.

#### **4.1.3 Определение параметров волны давления при сгорании газо-, паро- или пылевоздушного облака**

При изучении темы «Взрывы. Ударные волны и детонация» дисциплины теория горения и взрыва, рассматривались причины образования ударной волны при сгорании газо-,паро-, пылевоздушных смесей. Вам уже известно, что ее образование возможно только при кинетическом горении (т.е. горении предварительно перемешанной горючей смеси), при горении в диффузионном режиме ударная волна не образуется.

В соответствии с Методикой основными этапами расчета являются:

1. определение ожидаемого режима сгорания облака;
2. расчет максимального избыточного давления и импульса фазы сжатия воздушных волн давления для различных режимов.

Для определения количественных характеристик волн давления необходимо определить

- концентрация горючего вещества в смеси  $C_G$ ;

- эффективный энергозапас горючей смеси  $E$ , который определяется по формуле.

Для определения концентрации горючего вещества в смеси  $C_G$ , требуется определить объем облака  $V_o$  ограниченного НКПР. Для упрощения модели принято, что облако в форме цилиндра высотой  $z_{НКПР}$  и радиусом основания  $R_{НКПР}$ .

$$V_o = \pi \cdot R_{НКПР}^2 \cdot z_{НКПР}, \quad (4.10)$$

Концентрация пара в таком облаке будет определена по формуле:

$$C_G = \frac{m_n}{V_o}, \quad (4.11)$$

где

$m_{п}$  - масса паров ЛВЖ, поступивших в открытое пространство за время испарения, кг

$V_o$  – объем облака паровоздушной смеси ограниченного НКПР.

Эффективный энергозапас в соответствии с Методикой определяется из соотношения:

$$E = \begin{cases} m_n \cdot E_{уд}, & C_G \leq C_{ст} \\ m_n \cdot E_{уд} \cdot \frac{C_{ст}}{C_G}, & C_G > C_{ст} \end{cases}, \quad (4.12)$$

где

$m_{п}$  - масса горючего вещества, содержащегося в облаке, с концентрацией между нижним и верхним концентрационным пределом распространения пламени. Допускается величину  $m_{п}$  принимать равной массе горючего вещества, содержащегося в облаке, с учетом коэффициента  $Z$  участия горючего вещества во взрыве. При отсутствии данных коэффициент  $Z$  может быть принят равным 0,1.

$E_{уд}$  - удельная теплота сгорания горючего вещества (определяется в соответствии с Методикой), Дж.

Для типичных углеводородов принимается в расчет значение удельной теплоты сгорания  $E_{уд0} = 44$  МДж/кг. Для иных горючих веществ в расчетах используется удельное энерговыделение  $E_{уд} = \beta E_{уд0}$ . Здесь  $\beta$  - корректировочный параметр. Для условно выделенных классов горючих веществ величины параметра  $\beta$  представлены в таблице 19.

Таблица 19 - Корректировочный коэффициент  $\beta$

Классы горючих веществ	$\beta$	Классы горючих веществ	$\beta$
Класс 1		Класс 3	
Ацетилен	1,1	Кумол	0,84
Метилацетилен	1,05	Метиламин	0,70
Винилацетилен	1,03	Спирты:	
Окись этилена	0,62	Метиловый	0,45
Гидразин	0,44	Этиловый	0,61
Изопропилнитрат	0,41	Пропиловый	0,69
Этилнитрат	0,30	Амиловый	0,79
Водород	2,73	Циклогексан	1
Нитрометан	0,25	Ацетальдегид	0,56
Класс 2		Винилацетат	0,51
Этилен	1,07	Бензин	1
Диэтилэфир	0,77	Гексан	1
Дивинилэфир	0,77	Изооктан	1
Окись пропилена	0,7	Пиридин	0,77
Акролеин	0,62	Циклопропан	1
Сероуглерод	0,32	Этиламин	0,80

Классы горючих веществ	$\beta$	Классы горючих веществ	$\beta$
Бутан	1	Класс 4	
Бутилен	1		
Бутадиен	1		
1,3-Пентадиен	1	Метан	1,14
Этан	1	Трихлорэтан	0,15
Диметилэфир	0,66	Метилхлорид	0,12
Диизопропиловый эфир	0,82	Бензол	1
ШФЛУ	1	Декан	1
Пропилен	1	Додекан	1
Пропан	1	Метилбензол	1
Класс 3		Метилмеркаптан	0,53
Винилхлорид	0,42	Окись углерода	0,23
Сероводород	0,34	Дихлорэтан	0,24
Ацетон	0,65	Дихлорбензол	0,42
		Трихлорэтан	0,14

В рамках расчета в курсовой работе определение  $E_{уд0}$  возможно определить по справочнику [7] или по формуле Д.И. Менделеева.

$$Q_{гор}^{низ} = 339,4 \cdot (\%C) + 1257 \cdot (\%H) - 108,9 [(\%O) + (\%N) - (\%S)] - 25,1 \cdot [9 \cdot (\%H) + W], \text{кДж / кг} \quad (4.13)$$

где: (%C), (%H), (%O), (%N), (%S). W - содержание в горючем веществе углерода, водорода, кислорода, азота, серы и влаги соответственно, масс. %.

#### 4.1.3.1 Классификация горючих веществ по степени чувствительности

Вещества, способные к образованию горючих смесей с воздухом, по степени своей чувствительности к возбуждению взрывных процессов разделены на четыре класса:

класс 1 - особо чувствительные вещества (размер детонационной ячейки менее 2 см);

класс 2 - чувствительные вещества (размер детонационной ячейки лежит в пределах от 2 до 10 см);

класс 3 - средне чувствительные вещества (размер детонационной ячейки лежит в пределах от 10 до 40 см);

класс 4 - слабо чувствительные вещества (размер детонационной ячейки больше 40 см).

Классификация наиболее распространенных в промышленном производстве горючих веществ приведена в таблице 20. В случае, если вещество не внесено в классификацию, его следует классифицировать по аналогии с имеющимися в списке веществами, а при отсутствии информации о свойствах данного вещества, его следует отнести к классу 1, т.е. рассматривать наиболее опасный случай.

Таблица 20 - **Классификация веществ по степени чувствительности**

Класс 1	Класс 2	Класс 3	Класс 4
Ацетилен	Акрилонитрил	Ацетальдегид	Бензол
Винилацетилен	Акролеин	Ацетон	Декан
Водород	Бутан	Бензин	о-
Гидразин	Бутилен	Винилацетат	Дихлорбензол
Изопропилнитрат	Бутадиен	Винилхлорид	Додекан
Метилацетилен	1,3-Пентадиен	Гексан	Метан
	Пропан	Изооктан	Метилбензол

Класс 1	Класс 2	Класс 3	Класс 4
Нитрометан Окись пропилен-на Окись этилена Этилнитрат	Пропилен Сероуглерод Этан Этилен Эфиры: диметиловый дивиниловый метилбутиловый Широкая фракция легких углеводородов	Метиламин Метилацетат Метилбутилкетон Метилпропилкетон Метилэтилкетон Октан Пиридин Сероводород Спирты: метиловый этиловый пропиловый амиловый изобутиловый изопропиловый Циклогексан Этилформиат Этилхлорид	Метилмеркаптан Метилхлорид Окись углерода Этиленбензол

#### 4.1.3.2 Классификация окружающего пространства по степени загроможденности

Характером загроможденности окружающего пространства в значительной степени определяется скорость распространения пламени

при сгорании облака и, следовательно, параметры волны давления. Характеристики загроможденности окружающего пространства разделяются на четыре класса:

класс I - наличие длинных труб, полостей, каверн, заполненных горючей смесью, при сгорании которой возможно ожидать формирование турбулентных струй продуктов сгорания, имеющих размеры не менее трех размеров детонационной ячейки данной смеси. Если размер детонационной ячейки для данной смеси не известен, то минимальный характерный размер струй принимается равным 5 см для веществ класса 1, 20 см для веществ класса 2, 50 см для веществ класса 3 и 150 см для веществ класса 4;

класс II - сильно загроможденное пространство: наличие полузамкнутых объемов высокая плотность размещения технологического оборудования, лес, большое количество повторяющихся препятствий;

класс III - средне загроможденное пространство: отдельно стоящие технологические установки, резервуарный парк;

класс IV - слабо загромождение и свободное пространство.

#### **4.1.3.3 Определение ожидаемого режима сгорания облака**

Ожидаемый режим сгорания облака зависит от типа горючего вещества и степени загроможденности окружающего пространства.

Ожидаемый режим сгорания облака определяется с помощью таблицы 21, в зависимости от класса горючего вещества и класса загроможденности окружающего пространства.

**Таблица 21 - Классификация режимов сгорания**

Класс горючего вещества	Класс загроможденности окружающего пространства			
	I	II	III	IV

Класс горючего	Класс загроможденности окружающего пространства			
	1	2	3	4
1	1	1	2	3
2	1	2	3	4
3	2	3	4	5
4	3	4	5	6

#### 4.1.3.4 Классификация режимов сгорания облака

Для оценки воздействия сгорания облака возможные режимы сгорания разделяются на шесть классов по диапазонам скоростей их распространения следующим образом:

класс 1 - детонация или горение со скоростью фронта пламени 500 м/с и более;

класс 2 - дефлаграция, скорость фронта пламени 300 - 500 м/с;

класс 3 - дефлаграция, скорость фронта пламени 200 - 300 м/с;

класс 4 - дефлаграция, скорость фронта пламени 150 - 200 м/с;

класс 5 - дефлаграция, скорость фронта пламени определяется по формуле:

$$u = k_1 \cdot m_V^{\frac{1}{6}}, \quad (4.14)$$

где  $k_1$  - константа, равная 43;

$m_V$  - масса горючего вещества, содержащегося в облаке, кг;

класс 6 - дефлаграция, скорость фронта пламени определяется по формуле:

$$u = k_2 \cdot m_V^{\frac{1}{6}}, \quad (4.15)$$

где  $k_2$  - константа, равная 26;

$m_V$  - масса горючего вещества, содержащегося в облаке, кг.

При определении максимальной скорости фронта пламени для режимов сгорания 2-4 классов дополнительно рассчитывается видимая скорость фронта пламени по соотношению (4.14). В том случае, если полученная величина больше максимальной скорости, соответствующей данному классу, она принимается по формуле (4.14).

#### **4.1.3.5 Расчет максимального избыточного давления и импульса фазы сжатия воздушных волн давления**

Параметры воздушных волн давления (избыточное давление  $\Delta P$  и импульс фазы сжатия  $I_+$ ) в зависимости от расстояния от центра облака рассчитываются исходя из ожидаемого режима сгорания облака.

Рассчитывается соответствующее безразмерное расстояние по формуле:

$$R_x = \frac{R}{\left(\frac{E}{P_0}\right)^{\frac{1}{3}}}, \quad (4.16)$$

где  $R$  - расстояние от центра облака (так как по заданию на курсовую работу необходимо определить количественно величину опасных факторов пожара на заданных расстояниях от аварийного оборудования, то величина  $R$  принимает значения 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100), м;

$P_0$  - атмосферное давление, Па;

$E$  - эффективный энергозапас смеси, Дж.

### Класс 1 режима сгорания облака

Величины безразмерного давления  $P_x$  и импульс фазы сжатия  $I_x$  определяются по формулам (для газопаровоздушных смесей):

$$\ln(P_x) = -1,124 - 1,66 \cdot (\ln(R_x)) + 0,260 \cdot (\ln(R_x))^2, \quad (4.17)$$

$$\ln(I_x) = -3,4317 - 0,898 \cdot (\ln(R_x)) - 0,0096 \cdot (\ln(R_x))^2. \quad (4.18)$$

Формулы (4.17) и (4.18) справедливы для значений  $R_x$  более  $R_k$ , где  $R_k$  – нижнее граничное значение для безразмерного расстояния при детонационном горении (принимается равным 0,2).

В случае, если  $R_x < R_k$ , то  $P_x$  равно 18, а в формулу (4.18) вместо  $R_x$  подставляется величина  $R_x = 0,14$ .

### Классы 2 - 6 режима сгорания облака

Рассчитываются величины безразмерного давления ( $P_{x1}$ ) и импульса фазы сжатия  $I_{x1}$  по формулам:

$$P_{x1} = \frac{u^2}{C_o^2} \cdot \frac{\delta - 1}{\delta} \cdot \left( \frac{0,83}{R_x} - \frac{0,14}{R_x^2} \right), \quad (4.19)$$

$$I_{x1} = W \cdot (1 - 0,4 \cdot W) \cdot \left( \frac{0,06}{R_x} + \frac{0,01}{R_x^2} + \frac{0,0025}{R_x^3} \right), \quad (4.20)$$

$$W = \frac{u}{C_o} \cdot \left( \frac{\delta - 1}{\delta} \right), \quad (4.21)$$

где  $\sigma$  - степень расширения продуктов сгорания (для газопаровоздушных смесей допускается принимается равным 7, для пылевоздушных смесей 4);

$u$  - видимая скорость фронта пламени, м/с;

$C_0$  – скорость звука (допускается применять 340 м/с).

(В случае дефлаграции пылевоздушного облака величина эффективного энергозапаса умножается на коэффициент  $(\sigma - 1) / \sigma$ .

Формулы (4.19), (4.20) справедливы для значений  $R_x$  больших величины  $R_{кр1}$  (где  $R_{кр1}$  – нижнее граничное значение для безразмерного расстояния при дефлаграционном горении (принимается равным 0,34).

В случае, если  $R_x < R_{кр1}$ , в формулы (4.19) и (4.20) вместо  $R_x$  подставляется величина  $R_{кр1}$ .

В зависимости от режима сгорания облака определяются размерные величины избыточного давления и импульса фазы сжатия по формулам:

$$\Delta P = P_x \cdot P_o, \quad (4.22)$$

$$I^+ = I_x \cdot P_o^{\frac{2}{3}} \cdot \frac{E^{\frac{1}{3}}}{C_o}. \quad (4.23)$$

$P_o$  - атмосферное давление, Па;

$E$  - эффективный энергозапас смеси, Дж.

$C_o$  – скорость звука (допускается применять 340 м/с).

При этом режимах классов 2-6 вместо  $P_x$  и  $I_x$  подставляются величины  $P_{x1}$  и  $I_{x1}$ .

При выполнении курсовой работы необходимо определить значения  $\Delta P$  и  $I^+$  на заданных расстояниях от аварийного оборудования

(центра резервуара). По полученным данным необходимо построить графики, пример которых изображен на рисунках 4 и 5.

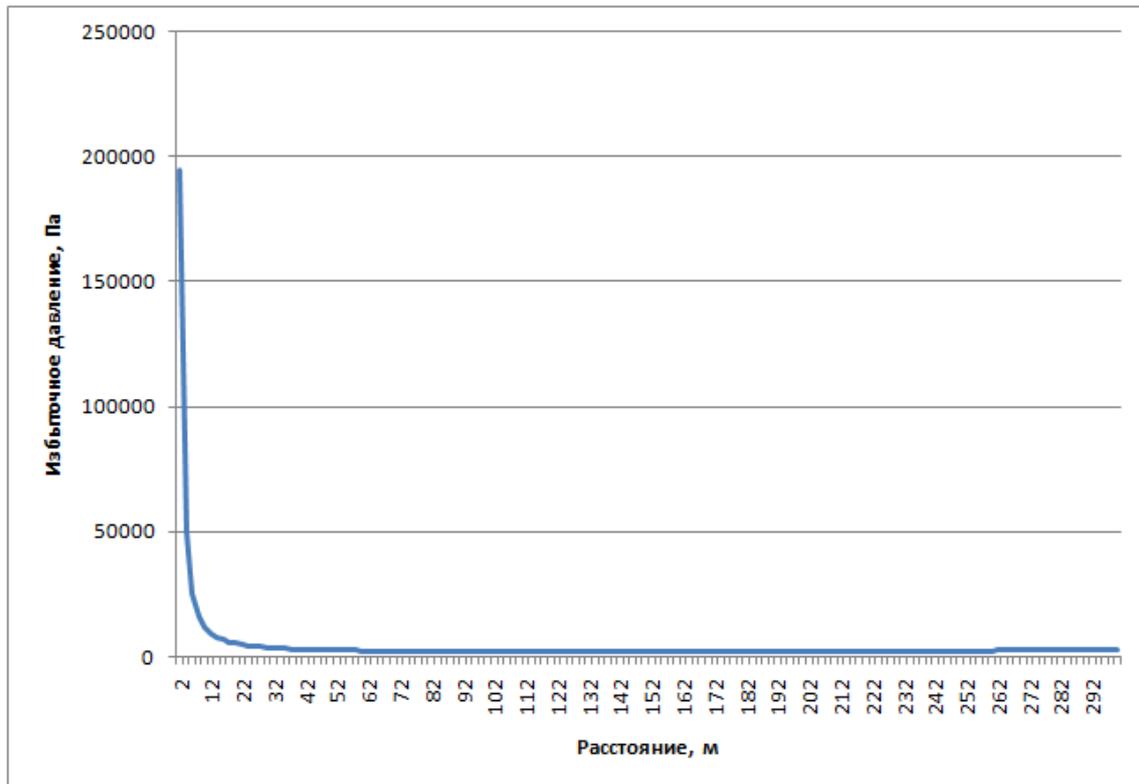


Рисунок 4 – Изменение величины избыточного давления взрыва ( $\Delta P$ ) на заданном расстоянии от эпицентра взрыва

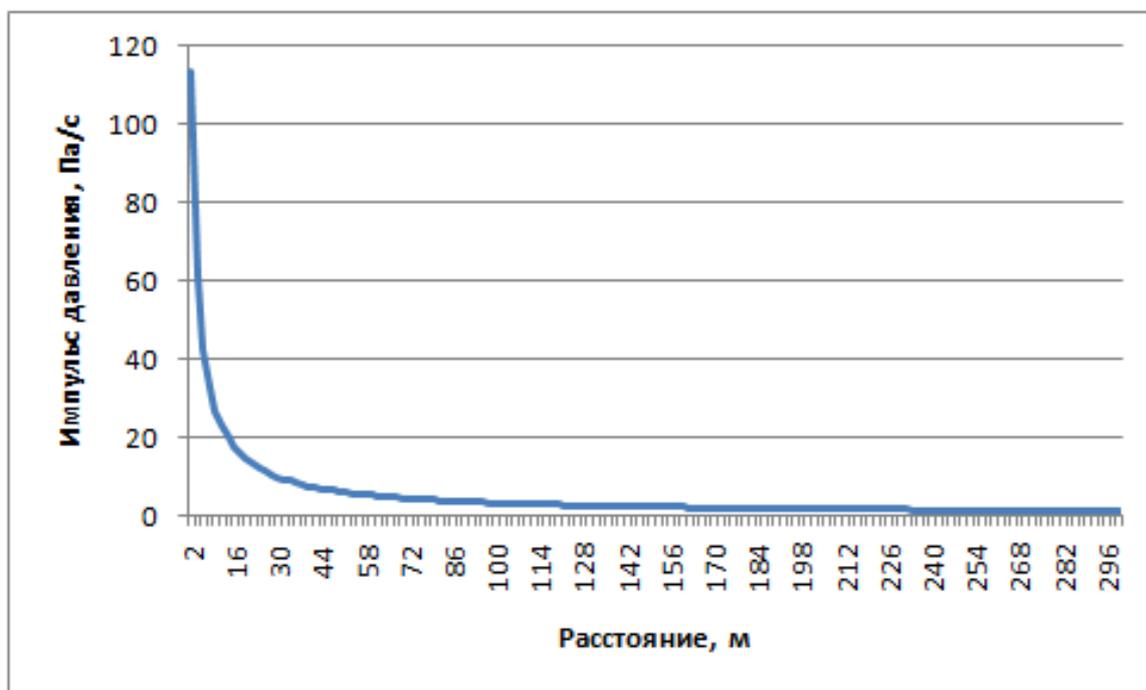


Рисунок 5 – Изменение импульса волны давления взрыва ( $\Gamma^+$ ) на заданном расстоянии от эпицентра взрыва

### **Пример 3.1.**

Определить величину максимального давления взрыва и импульса фазы сжатия воздушных волн давления на расстояниях 20, 40, 60, 80, 100 м от резервуара с п-ксилолом объемом 300 м<sup>3</sup>. Резервуар расположен на территории г. Санкт Петербурга. Территория вокруг резервуара – незаасфальтированная грунтовая поверхность.

В соответствии с п. 6 п.п. б Методики все содержимое резервуара при аварийной ситуации поступает в окружающее пространство. Степень заполнения резервуара в исходных данных не задана, поэтому объем жидкости принят равным объему резервуара.

По справочным данным [7] определены физико-химические свойства вещества.

Характеристика вещества:

п-ксилол C<sub>8</sub>H<sub>10</sub>

Плотность жидкости  $\rho_L = 856,7 \text{ кг/м}^3$ ;

Температура вспышки  $t_{\text{всп}} = 26^\circ\text{C}$ ;

Температура кипения  $t_{\text{кип}} = 138,35^\circ\text{C}$ ;

Теплота сгорания  $E_{\text{ЕД0}} = 41211,38 \text{ кДж/кг}$ ;

Константы уравнения Антуана:

- $A=6,25485$ ;
- $B=1537,082$ ;
- $C_A=223,608$ .

Масса жидкости, поступившей в окружающее пространство при разгерметизации резервуара, определяется по формуле (4.1):

$$m_a = \rho_L \cdot V_{\text{ж}} = 856,7 \cdot 300,0 = 2,6 \cdot 10^5 \text{ кг},$$

где:  $m_a$ - масса жидкости, кг;

$\rho_L$ - плотность жидкости (по справочнику [7]), кг/м<sup>3</sup>;

$V_{ж}$  - объем жидкости в резервуаре (по исходным данным),  $м^3$ .

При разгерметизации резервуара жидкость выливается на неспланированную грунтовую поверхность, следовательно площадь пролива в соответствии с п.7 Методики будет равна:

$$F_{пр} = f_p \cdot V_{ж} = 1500 \text{ м}^2.$$

Где:  $f_p$  - коэффициент разлития,  $м^{-1}$  ( $5 \text{ м}^{-1}$  при проливе на неспланированную грунтовую поверхность);

$V_{ж}$  - объем жидкости, поступившей в окружающее пространство при разгерметизации резервуара,  $м^3$ .

В соответствии с СП 131.13330.2018 «Строительная климатология максимальная температура в наиболее теплый период года для г. Санкт-Петербурга составляет  $37^{\circ}\text{C}$ , с учётом того что температура вспышки п-ксилола  $26^{\circ}\text{C}$ , то над поверхностью пролива образуется паровоздушное облако.

Масса паров в паровоздушном облаке при испарении со свободной поверхности будет определяться площадью пролива ( $F_{пр}$ ), интенсивностью испарения ( $W$ ) при заданных условиях и временем испарения ( $\tau_E$ ).

Интенсивность испарения определена по формуле (4.5) :

$$W = 10^{-6} \cdot 4,6 \cdot \sqrt{106} \cdot 2,27 = 10,75 \cdot 10^{-5} \text{ кг} / \text{м}^2 \cdot \text{с}.$$

$M$  - молярная масса жидкости (для п-ксилола 106),  $\text{кг}/\text{кмоль}$ ;

где  $\eta$  – коэффициент, зависящий от скорости и температуры воздушного потока (при максимальной температуре в Санкт-Петербурге в наиболее теплый период года  $37^{\circ}\text{C}$  и скорости воздушного потока 2,8

м/с коэффициент  $\eta$  определен методом линейной интерполяции по таблице 18 и составляет 4,6);

$P_S$  – давление насыщенного пара, при расчетной температуре (при максимальной температуре в Санкт-Петербурге в наиболее теплый период года 37°C), кПа

$$P_H = 10,0^{\left(\frac{A-B}{C+t_{кин}}\right)} = 10,0^{\left(\frac{6,25485-1537,082}{223,608+138,35}\right)} = 101,97 \text{ кПа},$$

$$P_H = 10,0^{\left(\frac{A-B}{C+t_p}\right)} = 10,0^{\left(\frac{6,25485-1537,082}{223,608+37}\right)} = 2,27 \text{ кПа}.$$

$\tau_E$  - время поступления паров из резервуара (определяется в соответствии с п.6 п.п. «е» [9]), с

Время испарения всей массы пара-ксилола с пролива равна:

$$\tau_{исп} = \frac{m_a}{W \cdot F_{ПП}} = \frac{2,6 \cdot 10^5}{10,75 \cdot 10^{-5} \cdot 1500} = 1,6 \cdot 10^6 \text{ с}.$$

В соответствии с п.6 п.п. «е» [9], т.к. время полного испарения всей массы жидкости более 3600 с, то во взрыве будет участвовать только масса паров образовавшаяся за 3600 с:

$$m_{II} = \tau_E \cdot W \cdot F_{ПП} = 10,75 \cdot 10^{-5} \cdot 1500 \cdot 3600 = 580,5 \text{ кг}$$

После определения массы паров, участвующих во взрыве необходимо определить размеры паровоздушного облака.

Размеры образовавшегося облака определены в соответствии с п. 10 [9].

Плотность паров при заданных условиях:

$$\rho_{\Pi} = \frac{M}{V_0 \cdot (1 + 0,00367 \cdot t_n)} = \frac{106}{22,4 \cdot (1 + 0,00367 \cdot 37)} = 4,16 \text{ кг/м}^3$$

$$R_{HKIP} = 7,8 \cdot \left( \frac{m_n}{\rho_n \cdot C_{HKIP}} \right)^{0,33} = 7,8 \cdot \left( \frac{580,5}{4,16 \cdot 0,05} \right)^{0,33} = 98,7 \text{ м},$$

$$Z_{HKIP} = 0,26 \cdot \left( \frac{m_n}{\rho_n \cdot C_{HKIP}} \right)^{0,33} = 0,26 \cdot \left( \frac{580,5}{4,16 \cdot 0,05} \right)^{0,33} = 3,29 \text{ м}.$$

Для определения режима сгорания паровоздушного облака необходимо определить эффективный энергозапас горючей смеси. В соответствии с п.11 [9] эффективный энергозапас горючей смеси определяется в зависимости от концентрации горючего вещества в облаке. Объем облака определен по формуле (4.10).

$$V_o = \pi \cdot R_{HKIP}^2 \cdot Z_{HKIP} = 3,14 \cdot 98,7^2 \cdot 3,29 = 1,0 \cdot 10^5 \text{ м}^3,$$

Концентрация горючего в облаке определена по формуле (4.11).

$$C_{\Gamma} = \frac{m_n}{V_o} = \frac{580,5}{1,0 \cdot 10^5} = 4,45 \cdot 10^{-3} \text{ кг/м}^3,$$

$$C_{cm} = 92,8 \cdot 10^{-3} \text{ кг/м}^3.$$

Так как  $C_{\Gamma} < C_{cm}$ , эффективный энергозапас определенный по соотношению (4.12) равен:

$$E = m_v \cdot 0,1 \cdot E_{y\delta} = 580,5 \cdot 0,1 \cdot 41,2 \cdot 10^6 = 1,84 \cdot 10^9 \text{ Дж},$$

После определения эффективного энергозапаса горючей смеси необходимо определить ожидаемый режим сгорания.

В соответствии с п. 16 [9] ожидаемый режим сгорания облака зависит от степени чувствительности горючего вещества и степени загроможденности пространства.

В п. 13 [9] приведен перечень наиболее распространенных в промышленности веществ по классам, данная таблица приведена в настоящем пособии – таблица 20. Так как в приведенной таблице рассматриваемого вещества (п-ксилол) нет, то в соответствии с п. 13 п-ксилол относится к классу №1.

Для рассматриваемого варианта аварийной ситуации, когда на территории предусмотрено наличие только аварийного резервуара и здания, в соответствии с п. 15 [9] пространство принимаем среднезагроможденным (Класс III).

После определения класса чувствительности вещества и степени загроможденности пространства по данным п. 17 [9] и таблицы 21 настоящего пособия определим ожидаемый режим сгорания.

С учетом того, что класс чувствительности горючего 1, и класс по степени загроможденности пространства – III, то ожидаемый режим сгорания по таблице 21 будет 2.

Класс горючего вещества	Класс загроможденности окружающего пространства			
	I	II	III	IV
1	1	1	2	3
2	1	2	3	4
3	2	3	4	5
4	3	4	5	6

После определения класса ожидаемого режима сгорания облака необходимо определить величину безразмерного расстояния.

Рассчитано соответствующее безразмерное расстояние на расстоянии от центра от 20 метров до 100 метров с шагом 20:

$$R_{x20} = \frac{R}{(E/P_o)^{\frac{1}{3}}} = \frac{20}{\left(1,84 \cdot 10^9 / 10^5\right)^{0,33}} = 0,78 ,$$

$$R_{x40} = 1,57 ,$$

$$R_{x60} = 2,35 ,$$

$$R_{x80} = 3,13 ,$$

$$R_{x100} = 3,91 .$$

Величины безразмерного давления и импульса фазы сжатия определены по формулам для 2-го класса ожидаемого режима сгорания.

Так как рассматриваемого горение по режиму сгорания облака относится ко 2 классу, следовательно скорость фронта пламени:

$$u = k_1 \cdot m_v^{\frac{1}{6}} = 43 \cdot 580,5^{\frac{1}{6}} = 118,9 \text{ м / с.}$$

Расчет величины безразмерного избыточного горения на расстоянии от центра от 20 метров до 100 метров с шагом 20 для 2-го режима сгорания определены по формуле:

Максимальные избыточные давления равны:

$$P_{x20} = \frac{u^2}{C_o^2} \cdot \frac{\delta - 1}{\delta} \cdot \left( \frac{0,83}{R_x} - \frac{0,14}{R_x^2} \right) = \frac{118,9^2}{340^2} \cdot \frac{7-1}{7} \cdot \left( \frac{0,83}{0,78} - \frac{0,14}{0,78^2} \right) = 0,087 ,$$

$$P_{X40} = 0,049,$$

$$P_{X60} = 0,034,$$

$$P_{X80} = 0,026,$$

$$P_{X100} = 0,021.$$

Расчет величины безразмерного импульса фазы сжатия на расстоянии от центра от 20 метров до 100 метров с шагом 20 для 2-го режима сгорания определены по формулам (4.19)-(4.21):

$$W = \frac{u}{C_o} \cdot \left( \frac{\delta - 1}{\delta} \right) = 0,3.$$

$$I_{X20} = W \cdot (1 - 0,4 \cdot W) \cdot \left( \frac{0,06}{R_X} + \frac{0,01}{R_X^2} + \frac{0,0025}{R_X^3} \right) = 0,3 \cdot (1 - 0,4 \cdot 0,3) \cdot \left( \frac{0,06}{0,78} + \frac{0,01}{0,78^2} + \frac{0,0025}{0,78^3} \right) = 0,011$$

$$I_{X40} = 11 \cdot 10^{-3},$$

$$I_{X60} = 7,2 \cdot 10^{-3},$$

$$I_{X80} = 5,3 \cdot 10^{-3},$$

$$I_{X100} = 4,21 \cdot 10^{-3}.$$

По формулам (4.22) и (4.23) определены размерные величины избыточного давления взрыва и импульса фазы сжатия:

$$\Delta P_{20} = P_X \cdot P_o = 0,087 \cdot 10^5 = 8,74 \text{ кПа},$$

$$\Delta P_{40} = 4,95 \text{ кПа},$$

$$\Delta P_{60} = 3,44 \text{ кПа},$$

$$\Delta P_{80} = 2,63 \text{ кПа},$$

$$\Delta P_{100} = 2,13 \text{ кПа}.$$

$$I_{20}^+ = I_X \cdot P_o^{\frac{2}{3}} \cdot \frac{E^{\frac{1}{3}}}{C_o} = 0,023 \cdot (10^5)^{\frac{2}{3}} \cdot \frac{(1,84 \cdot 10^9)^{\frac{1}{3}}}{340} = 180,4 \text{ Па} \cdot \text{с},$$

$$I_{40}^+ = 85,3 \text{ Па} \cdot \text{с},$$

$$I_{60}^+ = 44,6 \text{ Па} \cdot \text{с},$$

$$I_{80}^+ = 41,2 \text{ Па} \cdot \text{с},$$

$$I_{100}^+ = 32,7 \text{ Па} \cdot \text{с}.$$

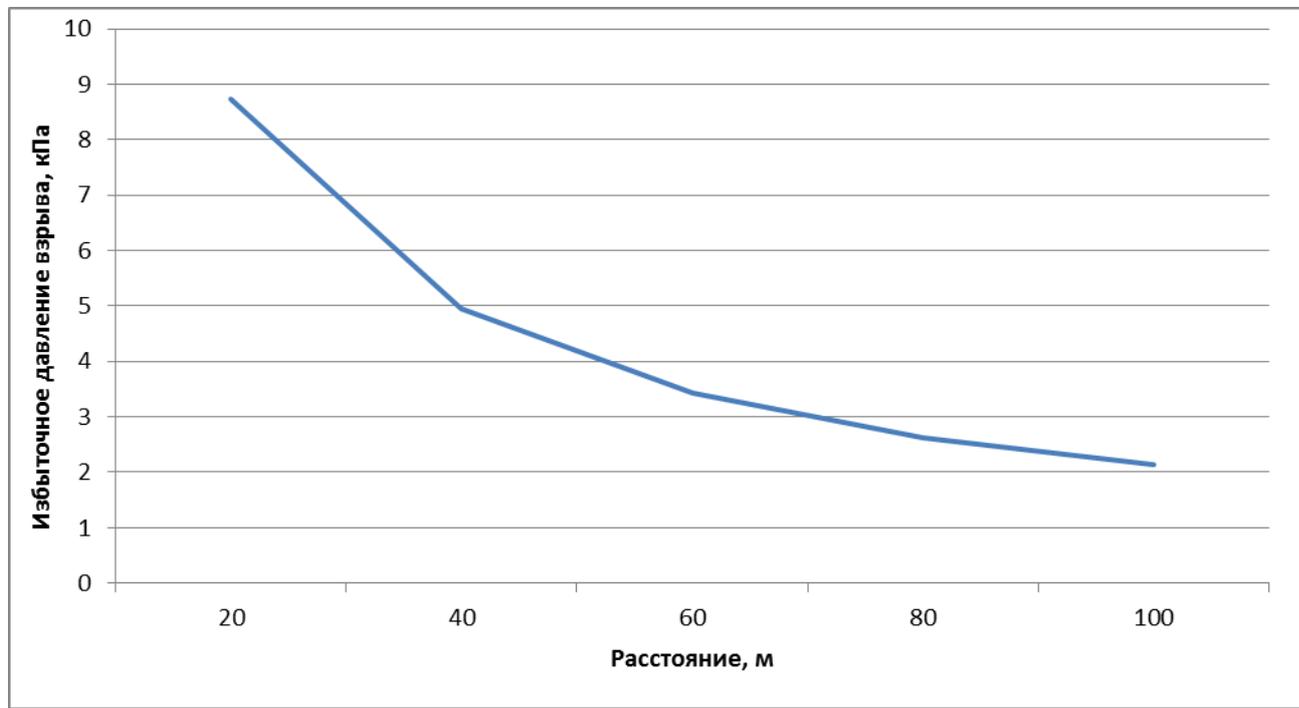


Рисунок 6 - Максимальное избыточное давление

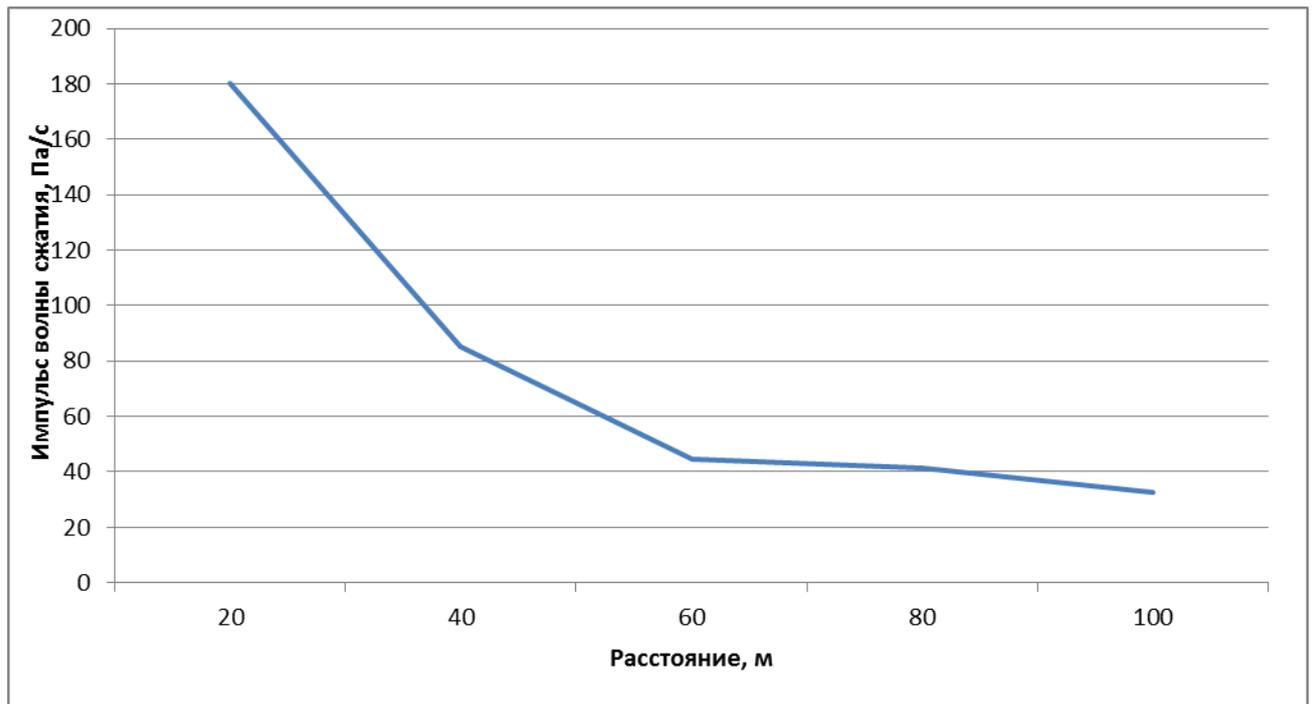


Рисунок 7 - Импульс фазы сжатия воздушных волн

#### 4.1.4 Интенсивность теплового излучения пожара пролива

Кроме ударной волны, образующейся при кинетическом сгорании паровоздушного облака, еще одним опасным фактором пожара является тепловое излучения при пожаре-пролива.

В настоящем разделе приводятся методы расчета интенсивности теплового излучения от пожара пролива на поверхность, а также радиуса воздействия продуктов сгорания паровоздушного облака в случае пожара-вспышки.

Интенсивность теплового излучения  $q$  (кВт/м<sup>2</sup>) для пожара пролива ЛВЖ, ГЖ, определяется по формуле:

$$q = E_f \cdot F_q \cdot \tau \quad (4.24)$$

где  $E_f$  - среднеповерхностная интенсивность теплового излучения пламени, кВт/м<sup>2</sup>;

$F_q$  - угловой коэффициент облученности;

$\tau$  - коэффициент пропускания атмосферы.

Значение  $E_f$  принимается на основе имеющихся экспериментальных данных.

При отсутствии данных для однокомпонентных жидкостей допускается величину  $E_f$  (кВт/м<sup>2</sup>) определять по формуле:

$$E_f = \frac{0,4 \cdot m' \cdot H_{CG}}{1 + 4 \cdot \frac{L}{d}} \quad (4.25)$$

где  $m'$  - удельная массовая скорость выгорания, кг/(м<sup>2</sup> с);

$H_{CG}$  – удельная теплота сгорания, кДж/кг;

$L$  – длина пламени, м.

При отсутствии данных для однокомпонентных жидкостей допускается величину  $m'$  (кг/(м<sup>2</sup> с)) определять по формуле:

$$m' = \frac{0,001 \cdot H_{CG}}{Lg + C_p(T_b + T_a)} \quad (4.26)$$

где  $Lg$  – удельная теплота испарения жидкости, кДж/кг;

$C_p$  – удельная теплоемкость жидкости, кДж/(кг·К);

$T_b$  – температура кипения жидкости при атмосферном давлении, К;

$T_a$  – температура окружающей среды (Принимается по СП 131.13330.2018, «Строительная климатология» как максимальная температура в наиболее теплый период года) К.

Угловой коэффициент облученности  $F_q$  определяется по формуле:

$$F_q = \sqrt{F_V^2 + F_H^2} \quad (4.27)$$

где  $F_V$ ,  $F_H$  - факторы облученности для вертикальной и горизонтальной площадок соответственно, определяемые для площадок, рас-

положенных в  $90^\circ$  секторе в направлении наклона пламени, по следующим формулам:

$$F_v = \frac{1}{\pi} \cdot \left\{ \begin{aligned} & -E \cdot \operatorname{arctg} D + E \cdot \left[ \frac{a^2 + (b+1)^2 - 2 \cdot b \cdot (1 + a \cdot \sin \theta)}{A \cdot B} \right] \cdot \operatorname{arctg} \left( \frac{A \cdot D}{B} \right) + \\ & + \frac{\cos \theta}{C} \cdot \left[ \operatorname{arctg} \left( \frac{a \cdot b - F^2 \cdot \sin \theta}{F \cdot C} \right) + \operatorname{arctg} \left( \frac{F^2 \cdot \sin \theta}{F \cdot C} \right) \right] \end{aligned} \right\} \quad (4.28)$$

$$F_H = \frac{1}{\pi} \cdot \left\{ \begin{aligned} & \operatorname{arctg} \left( \frac{1}{D} \right) + \frac{\sin \theta}{C} \cdot \left[ \operatorname{arctg} \left( \frac{a \cdot b - F^2 \cdot \sin \theta}{F \cdot C} \right) + \operatorname{arctg} \left( \frac{F^2 \cdot \sin \theta}{F \cdot C} \right) \right] - \\ & - \left[ \frac{a^2 + (b+1)^2 - 2 \cdot (b+1 + a \cdot b \cdot \sin \theta)}{A \cdot B} \right] \cdot \operatorname{arctg} \left( \frac{A \cdot D}{B} \right) \end{aligned} \right\} \quad (4.29)$$

Для расчетов факторов облученности необходимо определить промежуточные комплексы:

$$a = \frac{2L}{d} \quad (4.30)$$

$$b = \frac{2 \cdot X}{d} \quad (4.31)$$

$$A = \sqrt{(a^2 + (b+1)^2 - 2a(b+1) \cdot \sin \theta)} \quad (4.32)$$

$$B = \sqrt{(a^2 + (b-1)^2 - 2a(b-1) \cdot \sin \theta)} \quad (4.33)$$

$$C = \sqrt{(1 + (b^2 - 1) \cdot \cos \theta)} \quad (4.34)$$

$$D = \sqrt{\frac{b-1}{b+1}} \quad (4.35)$$

$$E = \frac{a \cdot \cos\theta}{b - a \cdot \sin\theta} \quad (4.36)$$

$$F = \sqrt{b-1} \quad (4.37)$$

где  $X$  - расстояние от геометрического центра пролива до облучаемого объекта (так как по заданию на курсовую работу необходимо определить количественно величину опасных факторов пожара на заданных расстояниях от аварийного оборудования, то величина  $X$  принимает значения 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100) , м;

$d$  - эффективный диаметр пролива, м;

$L$  – длина пламени, м;

$\theta$  - угол отклонения пламени от вертикали под действием ветра, (радиан).

Эффективный диаметр пролива  $d$  (м) рассчитывается по формуле:

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot F_{\text{ПР}}}{\pi}} \quad (4.38)$$

где  $F_{\text{ПР}}$  - площадь пролива, м<sup>2</sup>.

Длина пламени  $L$  (м) определяется по формулам:

при  $u^* \geq 1$

$$L = 55 \cdot d \cdot \left( \frac{m}{\rho_0 \cdot \sqrt{g \cdot d}} \right)^{0,67} \cdot u_0^{0,21} \quad (4.39)$$

при  $u^* < 1$

$$L = 42 \cdot d \cdot \left( \frac{m'}{\rho_0 \cdot \sqrt{g \cdot d}} \right)^{0,61} \quad (4.40)$$

где

$$u^* = \frac{\omega_0}{\sqrt[3]{\frac{m' \cdot g \cdot d}{\rho_n}}} \quad (4.41)$$

$m'$  - удельная массовая скорость выгорания топлива (определяемая по формуле (4.26)), кг/(м<sup>2</sup>·с);

$\rho_a$  - плотность окружающего воздуха, кг/м<sup>3</sup>;

$\rho_n$  - плотность насыщенных паров топлива при температуре кипения (определяется по формуле(4.9)), кг/м<sup>3</sup>;

$\omega_0$  - скорость ветра (принимается по таблице 10.1 СП 131.13330.2018, «Строительная климатология» как скорость ветра), м/с;

$g$  - ускорение свободного падения (9,81 м/с<sup>2</sup>).

Угол отклонения пламени от вертикали под действием ветра  $\theta$  рассчитывается по формуле:

$$\cos \theta = \begin{cases} 1, & \text{при } u_* < 1 \\ u_*^{-0,5}, & \text{при } u_* \geq 1 \end{cases} \quad (4.42)$$

Коэффициент пропускания атмосферы  $\tau$  для пожара пролива определяется по формуле:

$$\tau = \exp[-7 \cdot 10^{-4} \cdot (X - 0,5 \cdot d)] \quad (4.43)$$

При выполнении курсовой работы необходимо определить значения  $q$  заданных расстояниях от аварийного оборудования (центра резервуара). По полученным данным необходимо построить график, пример которого изображен на рисунке 8.

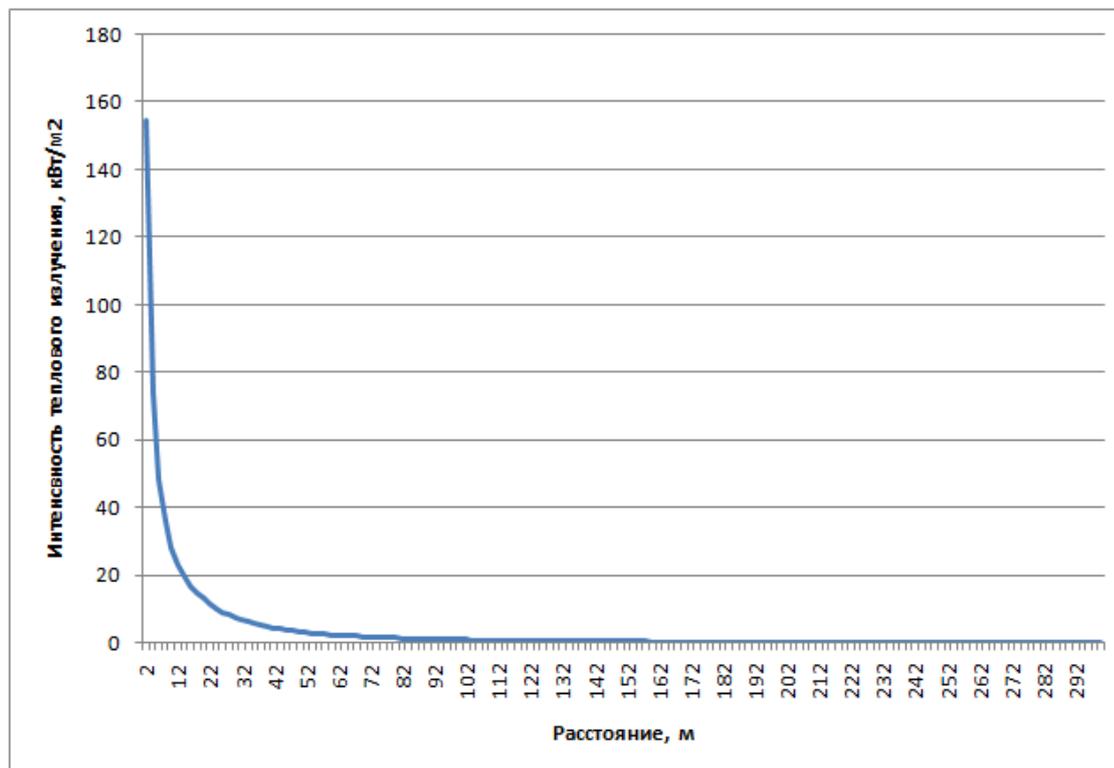


Рисунок 8 - Интенсивность теплового излучения при реализации пожара-пролива

**Пример 3.2.** Определить величину интенсивности теплового излучения  $q$  на расстояниях 20, 40, 60, 80, 100 м от резервуара с п-ксилолом объемом  $300 \text{ м}^3$ . Резервуар расположен на территории г. Санкт Петербурга. Территория вокруг резервуара – незаасфальтированная грунтовая поверхность.

По справочным данным [7] определены физико-химические свойства вещества.

Характеристика вещества:

п-ксилол  $\text{C}_8\text{H}_{10}$

Плотность жидкости  $\rho_L = 856,7 \text{ кг/м}^3$ ;

Температура вспышки  $t_{\text{всп}} = 26^\circ\text{C}$ ;

Температура кипения  $t_{\text{кип}} = 138,35^\circ\text{C}$ ;

Теплота сгорания  $H_{\text{сг}} = 41211,38 \text{ кДж/кг}$ ;

Удельная теплота испарения  $Lg=36,24 \text{ кДж/кг}$ ;

Константы уравнения Антуана:

- $A=6,25485$ ;
- $B=1537,082$ ;
- $C_A=223,608$ .

Используя значение площади пролива из предыдущего примера, определен эффективный диаметр пролива (м):

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot F_{\text{пр}}}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 1500}{3,14}} = 43,7 \text{ м.}$$

Зная удельную теплоту сгорания (41200 кДж/кг), температуру кипения (138,3°C), температуру окружающей среды (37 °C), удельную теплоту испарения (36,24 кДж/кг) и удельную теплоемкость (1,010 кДж/кг·К) п-ксилола, найдена удельная массовая скорость выгорания:

$$m' = \frac{0,001 \cdot H_{\text{сг}}}{Lg + C_p (T_g + T_a)} = \frac{0,001 \cdot 41,2}{36,24 + 1,01 \cdot (37 + 273)} = 0,054 \text{ кг/м}^2 \cdot \text{с}.$$

Видимая скорость пламени при скорости ветра – 2,8 м/с определена по формуле:

$$u^* = \frac{\omega_0}{\sqrt[3]{\frac{m' \cdot g \cdot d}{\rho_n}}} = \frac{2,8}{\sqrt[3]{\frac{0,054 \cdot 9,8 \cdot 43,7}{4,16}}} = 1,582 \text{ м/с}.$$

Так как значение видимой скорости пламени больше 1, длина пламени:

$$L = 55 \cdot d \cdot \left( \frac{m'}{\rho_n \cdot \sqrt{g \cdot d}} \right)^{0,67} \cdot u^{*0,21} =$$

$$= 55 \cdot 43,7 \cdot \left( \frac{0,054}{4,16 \cdot \sqrt{9,81 \cdot 43,7}} \right)^{0,67} \cdot 1,582^{*0,21} = 18,9 \text{ м.}$$

Так как видимая скорость пламени более 1 (фактически 1,582 м/с) угол отклонения пламени от вертикали под действием ветра  $\Theta$ , рассчитывается по формуле:

$$\cos(\theta) = u^{*-0,5}.$$

$$\theta = \arccos(u^{*-0,5}) = 0,652 \text{ (рад)}$$

Определены факторы облучаемости для вертикальной и горизонтальной площади на расстоянии от 10 м до 100 м, с шагом 10:

$$a = \frac{2L}{d} = \frac{2 \cdot 18,9}{43,7} = 1,89;$$

$$b = \frac{2 \cdot X}{d} = \frac{2 \cdot 20}{43,7} = 0,92;$$

$$A_{20} = \sqrt{(a^2 + (b+1)^2 - 2 \cdot a \cdot (b+1) \cdot \sin\theta)} =$$

$$= \sqrt{(1,89^2 + (0,92+1)^2 - 2 \cdot 1,89 \cdot (0,92+1) \cdot \sin 0,652)} = 2,39;$$

$$A_{40} = 4,14;$$

$$A_{60} = 6,04;$$

$$A_{80} = 7,99;$$

$$A_{100} = 9,97.$$

$$B_{20} = \sqrt{(a^2 + (b-1)^2 - 2 \cdot a \cdot (b-1) \cdot \sin\theta)} =$$

$$\sqrt{(1,89^2 + (0,92-1)^2 - 2 \cdot 1,89 \cdot (0,92-1) \cdot \sin 0,652)} = 1,51;$$

$$B_{40} = 2,39;$$

$$B_{60} = 4,14;$$

$$B_{80} = 6,04;$$

$$B_{100} = 7,99 ,$$

$$C_{20} = \sqrt{(1 + (b^2 - 1) \cdot \cos^2 \theta)} =$$

$$\sqrt{(1 + (0,92^2 - 1) \cdot \cos^2 0,652)} = 1,70;$$

$$C_{40} = 3,24;$$

$$C_{60} = 4,81;$$

$$C_{80} = 6,39;$$

$$C_{100} = 7,97 .$$

$$D_{20} = \sqrt{\frac{b-1}{b+1}} = \sqrt{\frac{0,92-1}{0,92+1}} = \infty;$$

$$D_{40} = 0,78;$$

$$D_{60} = 0,85;$$

$$D_{80} = 0,88;$$

$$D_{100} = 0,91 .$$

$$E_{20} = \frac{a \cdot \cos \theta}{b - a \cdot \sin \theta} = \frac{1,89 \cdot \cos 0,652}{0,92 - 1,89 \cdot \sin 0,652} = 1,76;$$

$$E_{40} = 0,53;$$

$$E_{60} = 0,31;$$

$$E_{80} = 0,22;$$

$$E_{100} = 0,17$$

$$F_{20} = \sqrt{b-1} = \sqrt{0,92-1} = \infty;$$

$$F_{40} = 3,87;$$

$$F_{60} = 5,92;$$

$$F_{80} = 7,94;$$

$$F_{100} = 9,95 .$$

$$F_v = \frac{1}{\pi} \cdot \left\{ \begin{array}{l} -E \cdot \operatorname{arctg} D + E \cdot \left[ \frac{a^2 + (b+1)^2 - 2 \cdot b \cdot (1 + a \cdot \sin \theta)}{A \cdot B} \right] \cdot \operatorname{arctg} \left( \frac{A \cdot D}{B} \right) + \\ + \frac{\cos \theta}{C} \cdot \left[ \operatorname{arctg} \left( \frac{a \cdot b - F^2 \cdot \sin \theta}{F \cdot C} \right) + \operatorname{arctg} \left( \frac{F^2 \cdot \sin \theta}{F \cdot C} \right) \right] \end{array} \right\}$$

$$F_H = \frac{1}{\pi} \cdot \left\{ \begin{array}{l} \operatorname{arctg} \left( \frac{1}{D} \right) + \frac{\sin \theta}{C} \cdot \left[ \operatorname{arctg} \left( \frac{a \cdot b - F^2 \cdot \sin \theta}{F \cdot C} \right) + \operatorname{arctg} \left( \frac{F^2 \cdot \sin \theta}{F \cdot C} \right) \right] - \\ - \left[ \frac{a^2 + (b+1)^2 - 2 \cdot (b+1 + a \cdot b \cdot \sin \theta)}{A \cdot B} \right] \cdot \operatorname{arctg} \left( \frac{A \cdot D}{B} \right) \end{array} \right\}$$

$$F_{V20} = \infty;$$

$$F_{V40} = 0,109;$$

$$F_{V60} = 0,041;$$

$$F_{V80} = 0,021;$$

$$F_{V100} = 0,012;$$

$$F_{H20} = \infty;$$

$$F_{H40} = 0,038;$$

$$F_{H60} = 7,67 \cdot 10^{-3};$$

$$F_{H80} = 2,61 \cdot 10^{-3};$$

$$F_{H100} = 1,17 \cdot 10^{-3}.$$

Угловой коэффициент облучаемости равен:

$$F_{q20} = \sqrt{F_V^2 + F_H^2} = \infty;$$

$$F_{q40} = 0,116;$$

$$F_{q60} = 0,042;$$

$$F_{q80} = 0,021.$$

$$F_{q100} = 0,012$$

Среднеповерхностное тепловое излучение пламени для однокомпонентных жидкостей в соответствии с п.23 Методики допускается определять по формуле:

$$E_f = \frac{0,4 \cdot m \cdot H_{CF}}{1,0 + 4,0 \cdot \frac{L}{d}} = 325,42 \text{ кВт/м}^2$$

Коэффициент пропускания атмосферы пожара пролива равен:

$$\tau_{20} = e^{(-7 \cdot 10^{-4} \cdot (X - 0,5d))} = 1,001;$$

$$\tau_{40} = 0,987;$$

$$\tau_{60} = 0,974;$$

$$\tau_{80} = 0,960$$

$$\tau_{100} = 0,947.$$

Определена интенсивность излучения пожара пролива

$$q_{20} = E_f \cdot F_q \cdot \tau = 153,8 \text{ кВт/м}^2.$$

$$q_{40} = 37,14 \text{ кВт/м}^2.;$$

$$q_{60} = 13,23 \text{ кВт/м}^2.;$$

$$q_{80} = 6,53 \text{ кВт/м}^2.;$$

$$q_{100} = 3,84 \text{ кВт/м}^2.$$

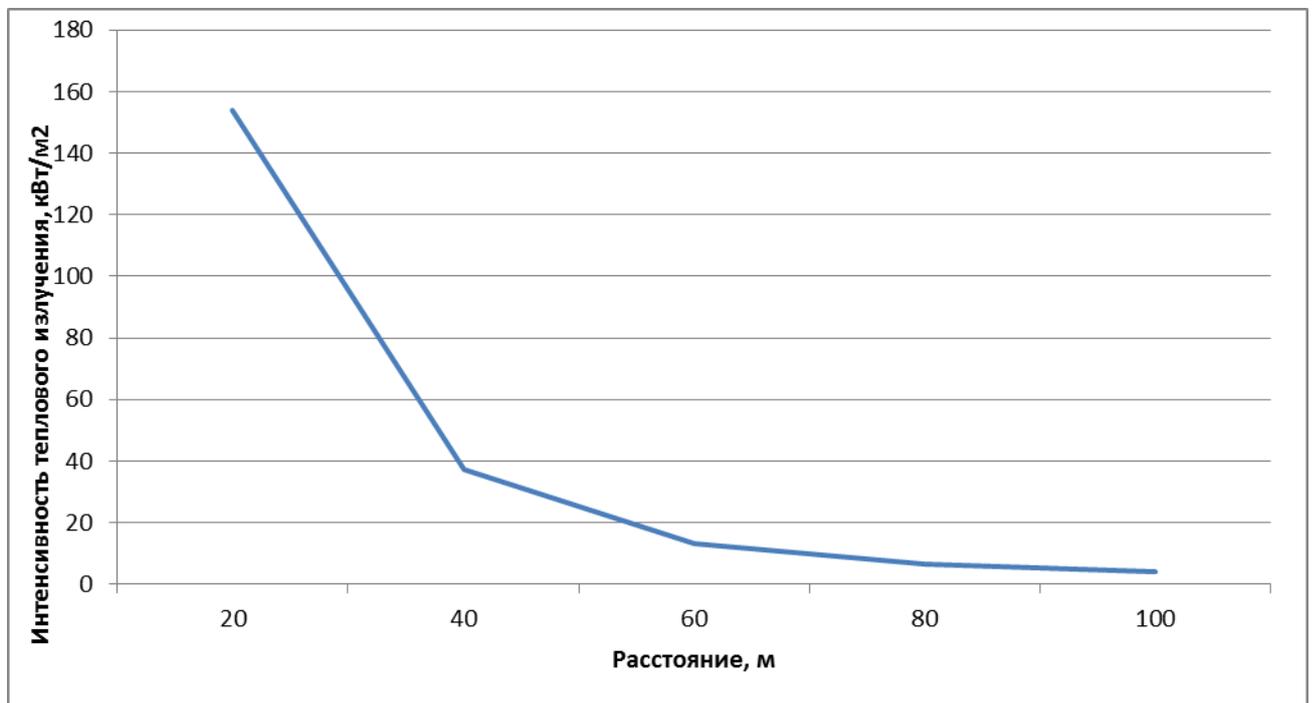


Рисунок 9 - Интенсивность теплового излучения при реализации пожара-пролива

## 4.2 Расчет опасных факторов при пожаре в здании

Расчет опасных факторов при пожаре в здании необходим в первую очередь для определения безопасного времени эвакуации людей из горящего здания. Безопасной эвакуация считается если расчетное время эвакуации людей из помещений с учетом времени начала эвакуации превышает время от начала времени пожара до блокирования путей эвакуации опасными факторами пожара.

Время блокирования путей эвакуации напрямую зависит от динамики развития пожара в помещении.

Динамика внутреннего пожара определяется главным образом параметрами пожарной нагрузки и газообменом помещения, в котором протекает пожар, с окружающей средой. Математическое описание такого процесса довольно сложно. Обусловлено это, прежде всего тем, что газообмен при пожаре является функцией параметров среды, как внутри горящего помещения, так и снаружи, а также количеством, размером и взаимном расположением проемов, технологических отверстий и неплотностей, через которые газообмен осуществляется. Кроме того, механизм газообмена, обусловленный разностью плотности газовой среды внутри помещения и снаружи, а также ее термическим расширением, не является величиной постоянной, и изменяется в зависимости от этапа развития пожара и условий его взаимодействия с окружающей средой. В связи с этим, при описании газообмена при пожаре всегда при расчетах используют определенные упрощения.

Время от начала пожара до блокирования эвакуационных путей в результате распространения на них опасных факторов пожара определяется путем выбора из полученных в результате расчетов значений критической продолжительности пожара минимального времени:

$$\tau_{\text{бл}} = \min \{ t_{\text{кр}}^T, t_{\text{кр}}^{\text{П.В.}}, t_{\text{кр}}^{\text{O}_2}, t_{\text{кр}}^{\text{Т.Г.}} \} \quad (4.44)$$

Критическая продолжительность пожара по каждому из опасных факторов определяется как время достижения этим фактором критического значения на путях эвакуации на высоте 1,7 м от пола. Критические значения по каждому из опасных факторов составляют:

по повышенной температуре - + 70°C;

по тепловому потоку - 1400 Вт/м<sup>2</sup>;

по потере видимости - 20 м;

по пониженному содержанию кислорода - 0,226 кг·м<sup>-3</sup>;

по каждому из токсичных газообразных продуктов горения (CO<sup>2</sup> - 0,11 кг·м<sup>-3</sup>, CO - 1,16·10<sup>-3</sup> кг·м<sup>-3</sup>, HCL - 23·10<sup>-6</sup> кг·м<sup>-3</sup>).

Для описания термогазодинамических параметров пожара могут применяться три вида моделей: интегральные, зонные (зональные) и полевые.

Выбор конкретной модели расчета времени блокирования путей эвакуации следует осуществлять, исходя из следующих предпосылок:

интегральный метод:

для зданий, содержащих развитую систему помещений малого объема простой геометрической конфигурации;

для помещений, где характерный размер очага пожара соизмерим с характерными размерами помещения и размеры помещения соизмеримы между собой (линейные размеры помещения отличаются не более чем в 5 раз);

для предварительных расчетов с целью выявления наиболее опасного сценария пожара;

зонный (зональный) метод:

для помещений и систем помещений простой геометрической конфигурации, линейные размеры которых соизмеримы между собой (линейные размеры помещения отличаются не более чем в 5 раз), когда размер очага пожара существенно меньше размеров помещения;

для рабочих зон, расположенных на разных уровнях в пределах одного помещения (площадки обслуживания оборудования, внутренние этажерки и т.д.);

полевой метод:

для помещений сложной геометрической конфигурации, а также помещений с большим количеством внутренних преград (например, многосветные пространства с системой галерей и примыкающих коридоров);

для помещений, в которых один из геометрических размеров гораздо больше (меньше) остальных (тоннели, закрытые галереи и т.д.);

для иных случаев, когда применимость или информативность зонных и интегральных моделей вызывает сомнение (уникальные сооружения, распространение пожара по фасаду здания, необходимость учета работы систем противопожарной защиты, способных качественно изменить картину пожара и т.д.).

При рассмотрении сценариев, связанных со сгоранием газо-, паро- или пылевоздушной смеси в помещении категории А или Б, условная вероятность поражения человека в этом помещении принимается равной 1 при сгорании газо-, паро- или пылевоздушной смеси в этом помещении до завершения эвакуации людей и 0 после завершения эвакуации людей.

#### **4.2.1 Интегральный метод**

Для помещения очага пожара, удовлетворяющего критериям применения интегрального метода, критическую продолжительность

пожара  $t_{кр}$  (с) по условию достижения каждым из опасных факторов пожара предельно допустимых значений в зоне пребывания людей (рабочей зоне) можно оценить по формулам:

по повышенной температуре:

$$t_{кр}^T = \left\{ \frac{B}{A} \cdot \ln \left[ 1 + \frac{70,0 - t_o}{(273,0 + t_o) \cdot z} \right] \right\} \quad (4.45)$$

по потере видимости:

$$t_{кр}^{П.В} = \left\{ \frac{B}{A} \cdot \ln \left[ 1 - \frac{V \cdot \ln(1,05 \cdot \alpha \cdot E)}{l_{np} \cdot B \cdot D_m \cdot z} \right]^{-1} \right\}^{1/n} \quad (4.46)$$

по пониженному содержанию кислорода:

$$t_{кр}^{O_2} = \left\{ \frac{B}{A} \cdot \ln \left[ 1 - \frac{0,044}{\left( \frac{B \cdot L_{O_2}}{V} + 0,27 \right) \cdot z} \right]^{-1} \right\}^{1/n} \quad (4.47)$$

по каждому из газообразных токсичных продуктов горения:

$$t_{кр}^{Т.Г.} = \left\{ \frac{B}{A} \cdot \ln \left[ 1 - \frac{V \cdot X}{B \cdot L_{CO_2} \cdot z} \right]^{-1} \right\}^{1/n} \quad (4.48)$$

$$B = \frac{353 \cdot C_p \cdot V}{(1 - \varphi) \cdot \eta \cdot Q_H} \quad (4.49)$$

где  $t_0$  - начальная температура воздуха в помещении, °С;

$B$  - размерный комплекс, зависящий от теплоты сгорания материала и свободного объема помещения, кг;

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

$A$  - размерный параметр, учитывающий удельную массовую скорость выгорания горючего вещества и площадь пожара, кг/сн;

$Z$  - безразмерный параметр, учитывающий неравномерность распределения опасного фактора пожара по высоте помещения;

$Q$  - низшая теплота сгорания материала, МДж/кг;

$C_p$  - удельная изобарная теплоемкость воздуха, МДж/кг;

$\phi$  - коэффициент теплопотерь;

$\eta$  - коэффициент полноты горения;

$V$  - свободный объем помещения, м<sup>3</sup>;

$\alpha$  - коэффициент отражения предметов на путях эвакуации;

$E$  - начальное освещение, лк;

$I_{\text{ПР}}$  - предельная дальность видимости в дыму, м;

$D_m$  - дымообразующая способность горящего материала, Нп·м<sup>2</sup>/кг;

$L$  - удельный выход токсичных газов при сгорании 1 кг горючего вещества, кг/кг;

$X$  - предельно допустимое содержание токсичного газа в помещении, кг/м<sup>3</sup>;

$L_{O_2}$  - удельный расход кислорода, кг/кг.

Свободный объем помещения соответствует разности между геометрическим объемом и объемом оборудования или предметов, находящихся внутри. При отсутствии данных допускается свободный объем принимать равным 80 % геометрического объема помещения.

Если под знаком логарифма получается отрицательное число, то данный опасный фактор пожара может не учитываться.

Параметр  $Z$  определяется по формуле:

$$z_1 = \frac{h}{H} \cdot e^{1,4 \cdot \frac{h}{H}} \text{ при } H \leq 6 \text{ м} \quad (4.50)$$

где  $h$  - высота рабочей зоны, м;

$H$  - высота помещения, м.

Высота рабочей зоны определяется по формуле:

$$h = h_{пл} + 1,7 - 0,5\delta \quad (4.51)$$

где  $h_{пл}$  - высота площадки, на которой находятся люди, над полом помещения, м;

$\delta$  - разность высот пола, равная нулю при горизонтальном его расположении, м.

Следует иметь в виду, что наибольшей опасности при пожаре подвергаются люди, находящиеся на более высокой отметке. При определении необходимого времени эвакуации следует ориентироваться на наиболее высоко расположенные в помещении участки возможного пребывания людей.

Параметры  $A$  и  $n$  определяются следующим образом:

для случая горения жидкости с установившейся скоростью:

$$A_1 = \Psi_{yd} \cdot F, \text{ при } n = 1 \quad (4.52)$$

для случая горения жидкости с неустановившейся скоростью:

$$A_1 = \frac{0,67 \cdot \Psi_{yd} \cdot F}{\sqrt{t_{cm}}}, \text{ при } n = 1,5 \quad (4.53)$$

для случая кругового распространения пламени по поверхности горючего вещества или материала:

$$A_1 = 1,05 \cdot \Psi_{yd} \cdot V^2, \text{ при } n = 3 \quad (4.54)$$

для вертикальной или горизонтальной поверхности горения в виде прямоугольника, одна из сторон которого увеличивается в двух направлениях за счет распространения пламени:

$$A_1 = \Psi_{yd} \cdot V \cdot b, \text{ при } n = 2 \quad (4.55)$$

где  $\Psi_F$  - удельная массовая скорость выгорания вещества, кг/(м<sup>2</sup>·с);

F – площадь пролива жидкости;

$\tau_{CT}$  – время установления стационарного режима горения жидкости, с;

v - линейная скорость распространения пламени, м/с;

b - перпендикулярный к направлению движения пламени размер зоны горения, м.

Случай факельного горения в помещении может рассматриваться как горение жидкости с установившейся скоростью с параметром A равным массовому расходу истечения горючего вещества из оборудования и показателем степени n равным 1.

При отсутствии специальных требований значения  $\alpha$  и  $E$  принимаются равными 0,3 и 50 лк соответственно, а  $l_{пр}$  равным 20 м.

При расположении людей на различных по высоте площадках критическую продолжительность пожара следует определять для каждой площадки.

#### 4.2.2 Зонный метод

В настоящее время расчет времени блокирования путей эвакуации, возможно провести во многих программных комплексах например Форгард, Ситис-Блок, CFAST. В курсовой работе возможно пользоваться любым из этих программных комплексов, но в примерах будет рассмотрен расчет времени эвакуации в программе CFAST.

Название модели CFAST расшифровывается как Consolidated Fire Growth and Smoke Transport Model (единая модель развития пожара и перемещения дыма). Программа написана на FORTRAN 90. Первая версия CFAST была выпущена в июне 1990 года пожарным исследовательским отделом Национального института стандартов и технологии США.

**Программа CFAST распространяется бесплатно и имеет открытый код, который может быть свободно модифицирован любым пользователем.** Скачать программу в зависимости от разрядности операционной системы Windows возможно перейдя по ссылке <https://pages.nist.gov/cfast/index.html>.

На сегодняшний день CFAST является одной из лучших двухзонных моделей для расчета тепломассопереноса при пожаре.

Двухзонная модель тепломассопереноса при пожаре предполагает деление каждого расчетного помещения на два контрольных объема – верхний (дымовой) слой и нижний слой. Дополнительными кон-

трольными объемами в помещении с источником пожара являются дымовая струя и припотолочная струя.

Программа CFAST 6.1 реализует двухзонную модель расчета тепломассопереноса при пожаре и позволяет прогнозировать параметры продуктов горения (температуру, снижение видимости, концентрацию токсичных продуктов горения) и их распространение по зданию.

### Пример расчета

В данном разделе описан пример расчета времени блокирования путей эвакуации в административно-производственном здании. Конфигурация здания приведена на рисунке 10. Геометрические размеры здания  $L1=5$  м,  $L2=2$  м,  $B1=3$  м,  $B2=4$  м. В качестве пожарной нагрузки принята типовая пожарная нагрузка [11] «Тара: древесина+картон+полистирол (0,5+0,25+0,25)».

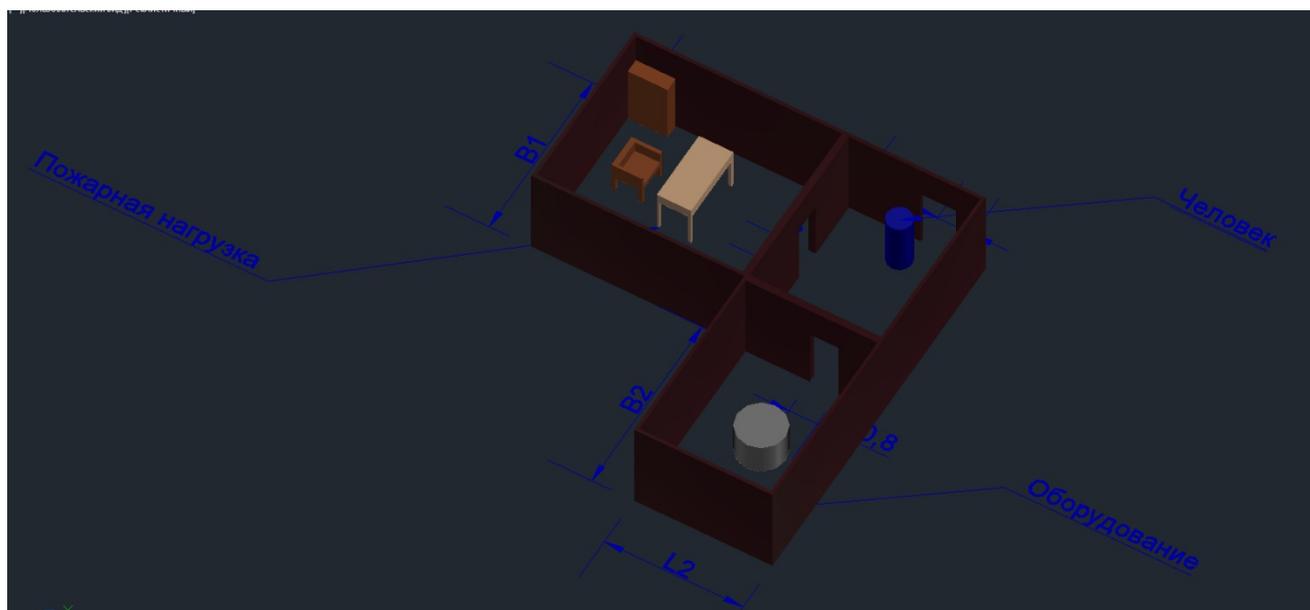


Рисунок 10- Конфигурация здания

Пример не содержит описания всех параметров и функций CFAST, в нем описаны только те параметры, которые необходимо задать для выполнения поставленной задачи. Для параметры, не разьяс-

ненных в примере, предполагается оставлять значение, заданное по умолчанию.

Более подробно о работе с программами CFAST и Smokeview читайте в соответствующих руководствах пользователей.

Целью выполнения данного раздела курсовой работы является определение времени блокирования путей эвакуации опасными факторами пожара в административно-производственном здании, состоящего из трех помещений, с индивидуально подобранными размерами, в зависимости от варианта. Пожар начинается в помещении с пожарной нагрузкой и распространяется по зданию.

Основная задача состоит в определении времени достижения опасными факторами пожара высоты рабочей зоны (1.7 метров) возле выхода из здания, где находится человек.

Важным моментом при использовании программы CFAST является выбор знакоразделителя. В настройках Windows (Панель управления -> Язык и региональные стандарты->Дополнительные параметры) выберите точку в качестве разделителя целой и дробной части числа.

При запуске программы CFAST на экране отображается окно представленное на рисунке 11 .

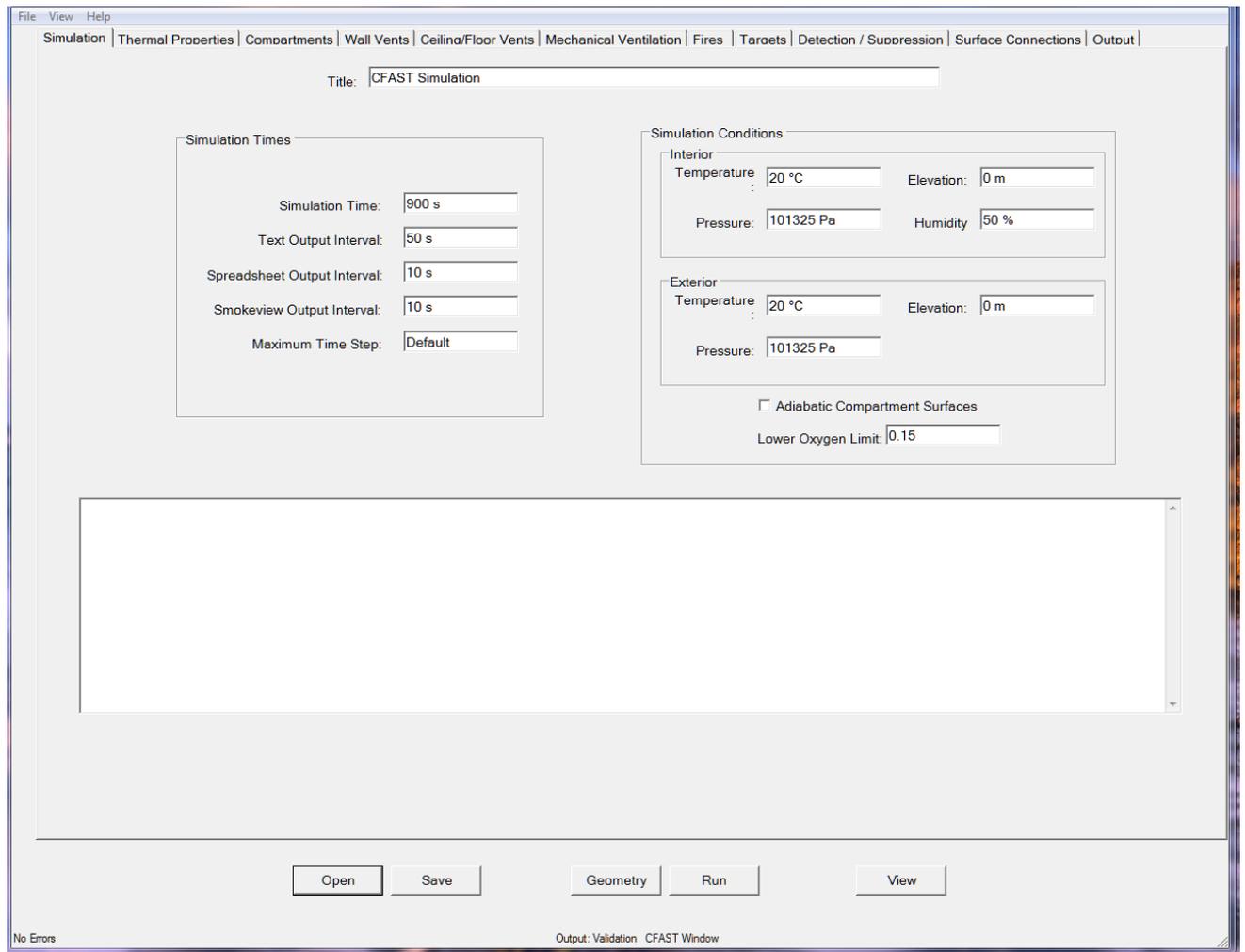


Рисунок 11- Экран выставления основных параметров моделирования

В этой вкладке выставляются температура и давление в помещении и на улице. В расчетной задаче температуру в помещении и на улице выбираем в соответствии с СП 131.13330.2018 для заданного населенного пункта в наиболее теплый период года. Время симуляции выставляем равным 600 с.

Здесь нужно задать различные характерные времена расчета:

- Время моделирования.

Simulation Time:

- Периодичность записи в текстовый \*.out файл.

Text Output Interval:

- Периодичность записи в двоичный файл.

Binary Output Interval:

- Периодичность записи в таблицу результатов (именно она понадобится для дальнейшей работы). Максимальное количество строк, выводимых в файл, равно 900, поэтому при большом времени расчета будьте внимательны.

Spreadsheet Output Interval:

- Периодичность сохранения результатов Smokewiew.

Smokeview Output Interval:

## Геометрия

Для ввода геометрии здания необходимо перейти во вкладку Compartments (отсеки).

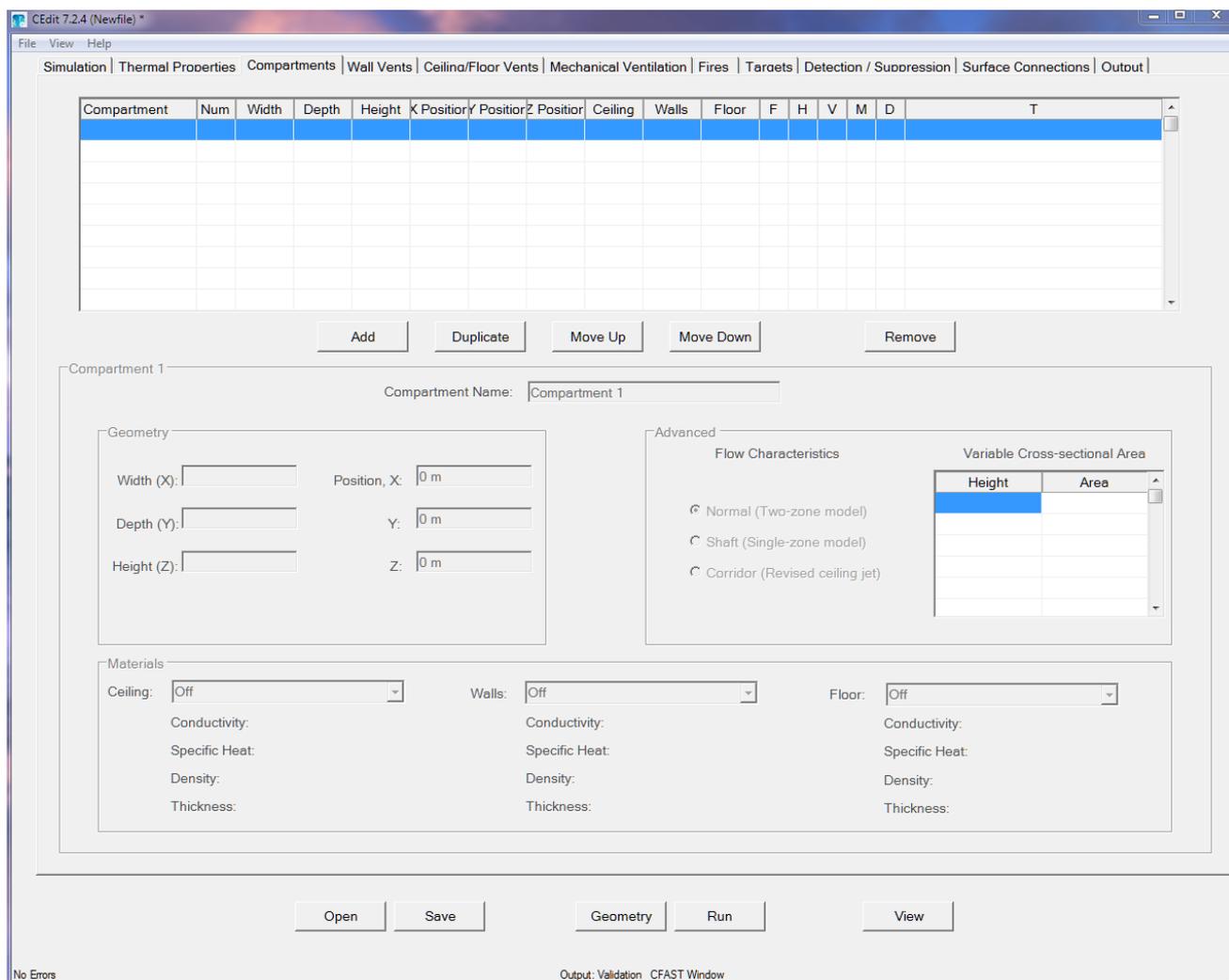


Рисунок 12 – Вкладка Compartments (отсеки)

Перед вводом данных о помещениях необходимо начертить на отдельном листе бумаги план здания с указанием геометрических размеров и начала координат. Начало координат каждого помещения должно быть в правом, переднем нижнем углу рассматриваемого помещения. Координаты должны иметь только положительные значения. Так как здание одноэтажное – координата по высоте (Z) равна 0. Пример планировок с указанием размеров здания и координатами реперных точек приведен на рисунках 13 и 14.

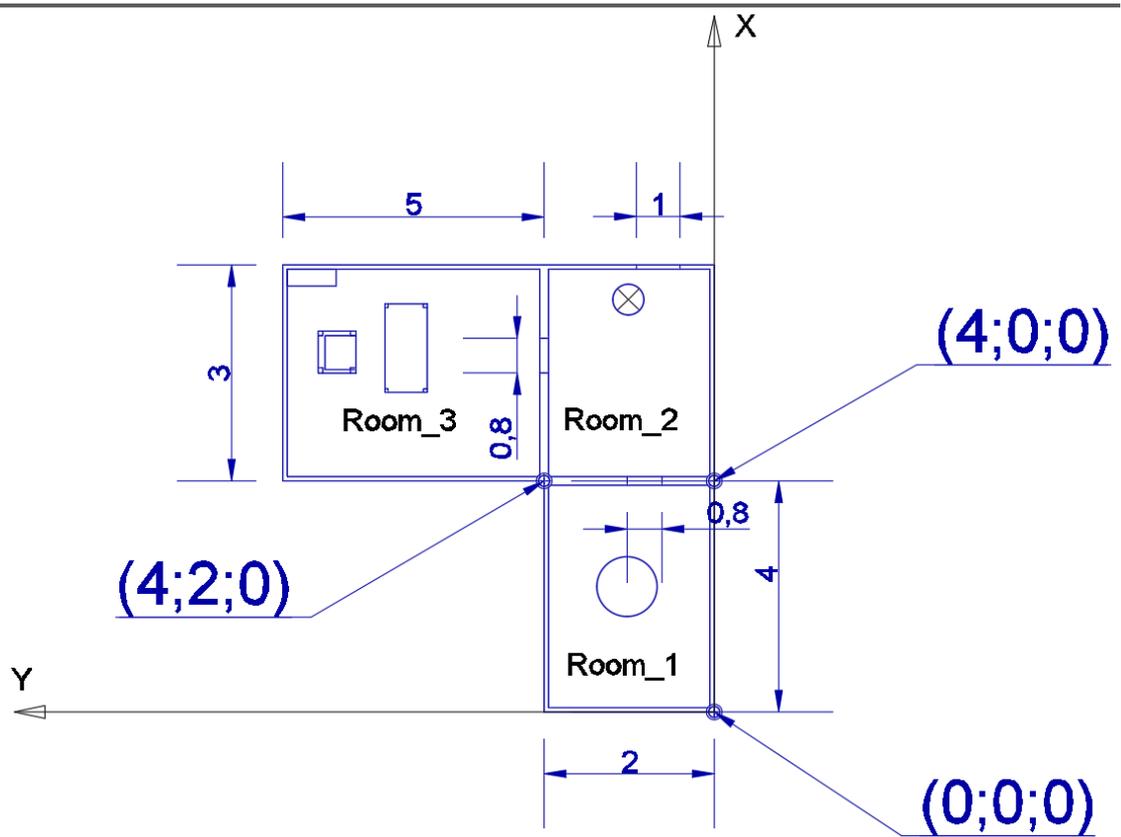


Рисунок 13 – Планировка здания с размерами и указанием координат для CFAST (2D-модель)

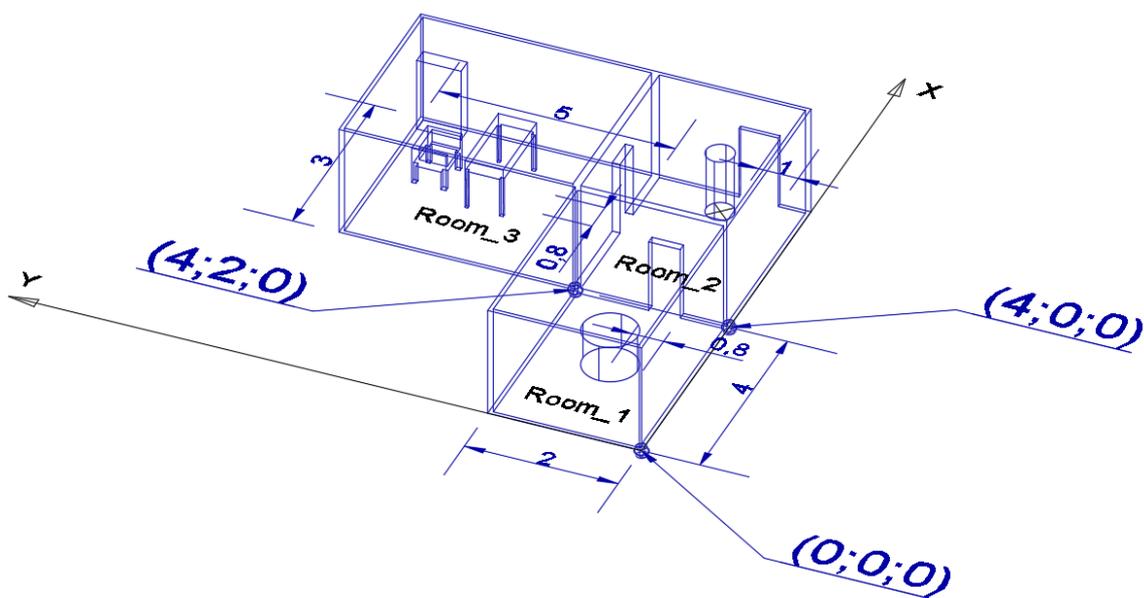
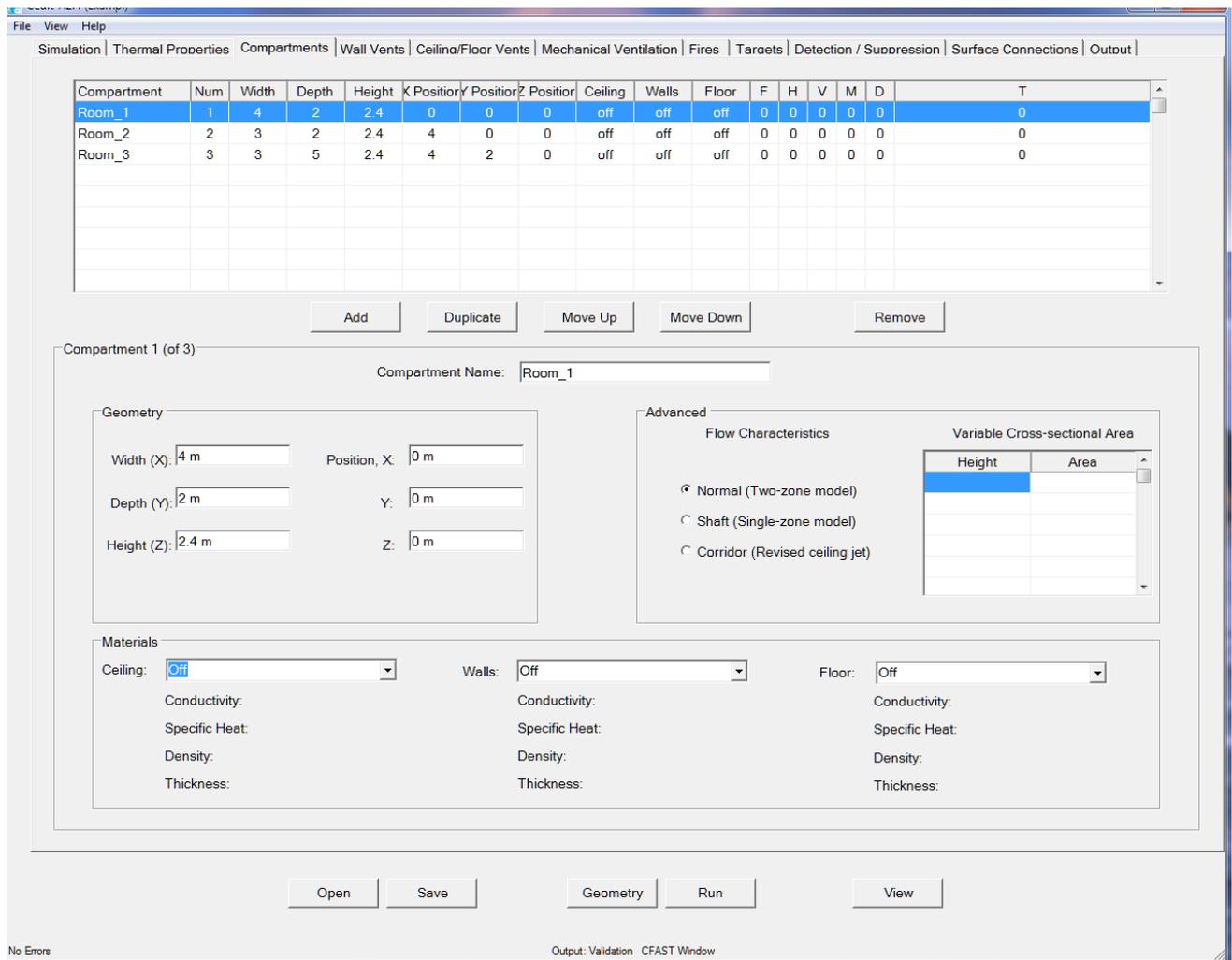


Рисунок 14 - Планировка здания с размерами и указанием координат для CFAST (3D-модель)

Прежде всего, необходимо задать название каждому помещению. Название помещений должны быть индивидуальными и не повторяться. Кроме того важно заметить наименование помещений должны быть заданы латиницей без пробелов.

Compartment Name:

Геометрия объекта описывается на вкладке Compartments.



Наверху вкладки располагается таблица существующих помещений с кратким их описанием.

Далее находятся следующие группы параметров:

Compartment Name

Geometry

Materials

Flow Characteristics

Variable Cross-Sectional Area

При задании геометрии время от времени проверяйте себя, нажав кнопку View.

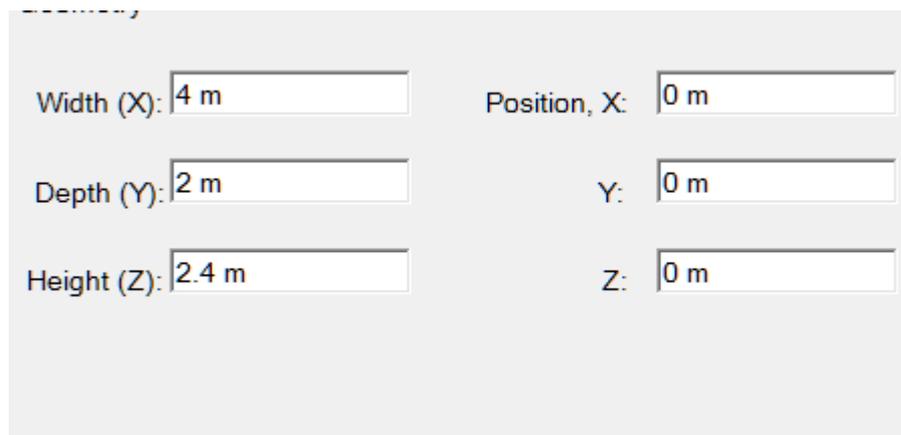
Эта кнопка запускает программу Smokeview, которая используется для визуализации результатов.

### Compartment Name (Название помещения)

### Geometry (Геометрия)

Здесь необходимо указать:

- Длину, ширину и высоту помещения в метрах.
- Смещение правого переднего нижнего угла помещения относительно начала координат.

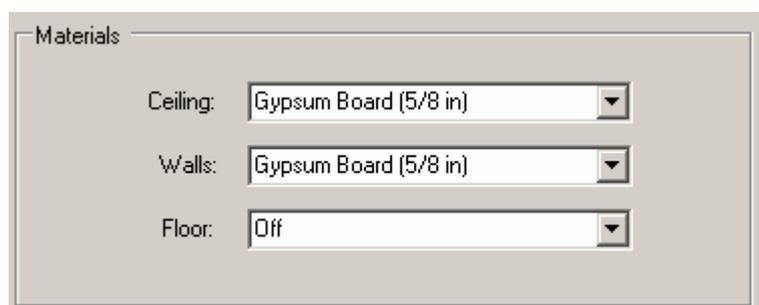


The screenshot shows a configuration panel for the geometry of a compartment. It contains six input fields arranged in two columns. The left column contains 'Width (X): 4 m', 'Depth (Y): 2 m', and 'Height (Z): 2.4 m'. The right column contains 'Position, X: 0 m', 'Y: 0 m', and 'Z: 0 m'.

### Materials (Материалы)

В этом разделе необходимо выбрать название материала потолка, стен и пола. Свойства материалов описываются в базе данных thermal.csv.

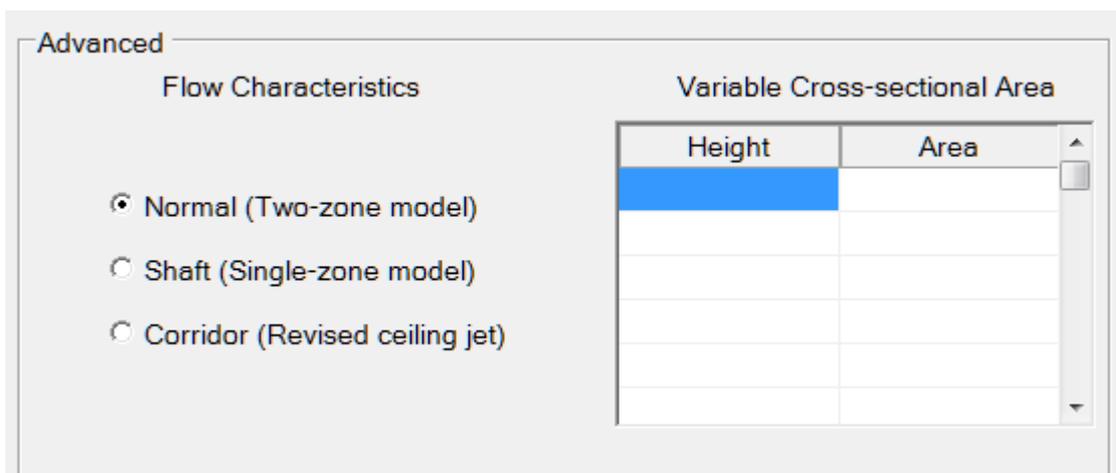
Если материал не задан (значение Off), то поверхность имеет адиабатические свойства (не обменивается теплом с окружающей средой).



The screenshot shows a configuration panel titled 'Materials'. It contains three dropdown menus. The 'Ceiling' dropdown is set to 'Gypsum Board (5/8 in)'. The 'Walls' dropdown is also set to 'Gypsum Board (5/8 in)'. The 'Floor' dropdown is set to 'Off'.

### Flow Characteristics (Свойства потока)

В данном разделе задается режим описания потока.



Существует три варианта – Normal, Shaft и Corridor.

Shaft нужно выбирать для шахт и лестниц (высота много больше длины), в этом случае расчет помещения производится с помощью интегральной модели (поскольку дымовая струя взаимодействует со стенами помещения и смешивается с нижним слоем).

Corridor нужно выбирать если длина помещения много больше ширины. В этом случае заполнение коридора дымом происходит неравномерно, и для уменьшения ошибки расчета вводится задержка распространения дыма.

**Variable Cross-Sectional Area (Изменение поперечного сечения)**

Данный раздел используется, если вертикальное сечение помещения меняется по высоте (например, помещение сужается кверху).

В первой колонке задается высота, во второй – соответствующая этой высоте площадь поперечного сечения

## **Проемы**

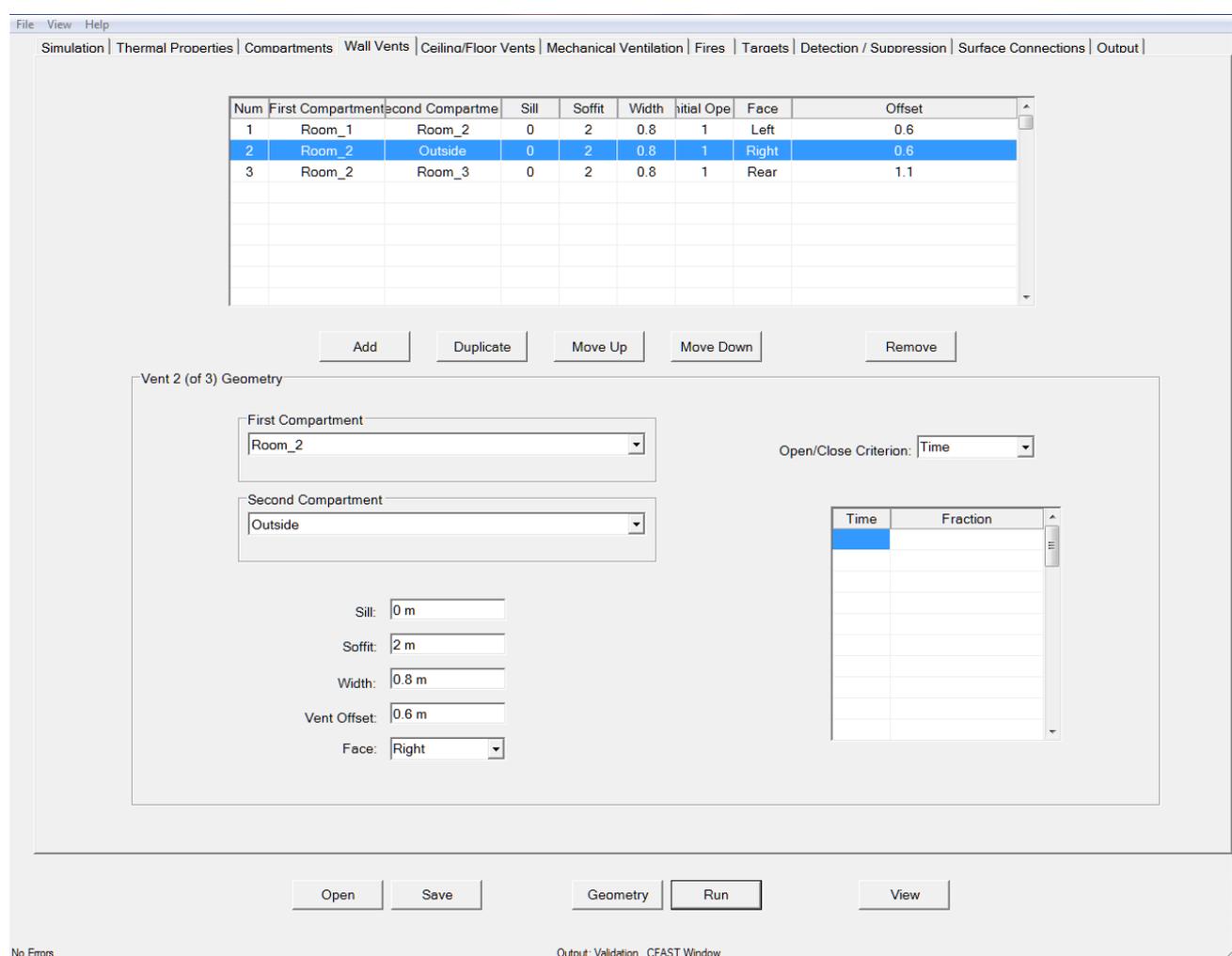
После того как в программу задали геометрические размеры всех помещений и материалы стен необходимо объединить эти помещения проемами друг с другом и окружающей средой.

В программе CFAST предусмотрено три варианта вентиляционных отверстий – горизонтальные (соединяющие помещения по гори-

зонтали – двери или окна), вертикальные (соединяющие помещения, находящиеся одно над другим – фонари или отверстия в перекрытиях) и отверстия принудительной вентиляции, через которые в помещения поступает или удаляется воздух.

В курсовой работе отсутствуют сведения об устройстве принудительной вентиляции, поэтому рассматриваться будет только горизонтальные проемы.

Горизонтальные вентиляционные отверстия описываются на вкладке Horizontal Flow Vents (или в CFAST x64 – Wall Vents).



Во вкладке описываются параметры отверстий, которые можно разделить на следующие группы:

Расположение отверстия.

Геометрия отверстия.

Факторы открытия.

При задании вентиляционных отверстий время от времени проверяйте себя, нажав кнопку View. Эта кнопка запускает программу Smokeview, которая используется для визуализации результатов.

Расположение отверстия

Вентиляционное отверстие соединяет между собой два помещения. Соответственно, необходимо задать:

- Названия соединяемых помещений (Если вместо одного из помещений выбран Outside, вентиляционное отверстие ведет «на улицу»).

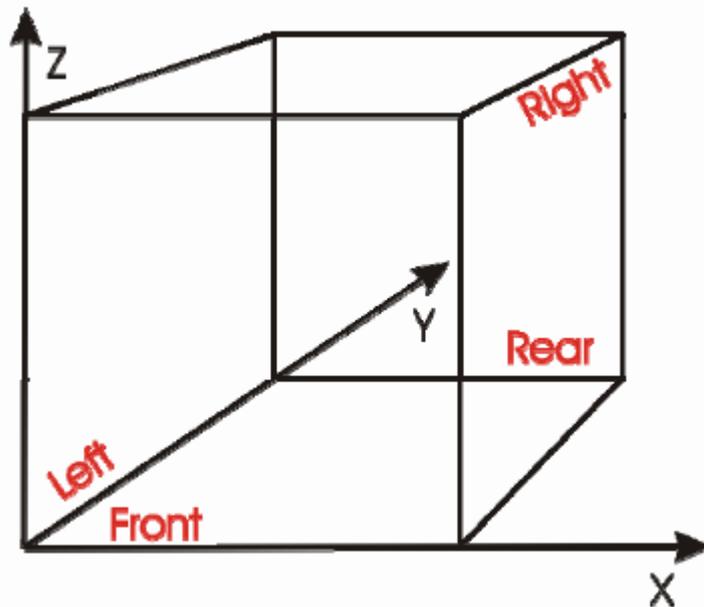
- Высота нижнего края отверстия над уровнем пола первого помещения (Sill).

- Высота верхнего края отверстия над уровнем пола первого помещения (Soffit).

- Ширина отверстия (Width).

- Расстояние от серединной линии отверстия до начальной точки помещения (Vent Offset).

Кроме того, необходимо задать грань помещения, на которой размещается отверстие.



### Факторы открытия

Один раз за расчет отверстие может изменить свое состояние – открыться либо закрыться. Тогда нужно задать следующие параметры:

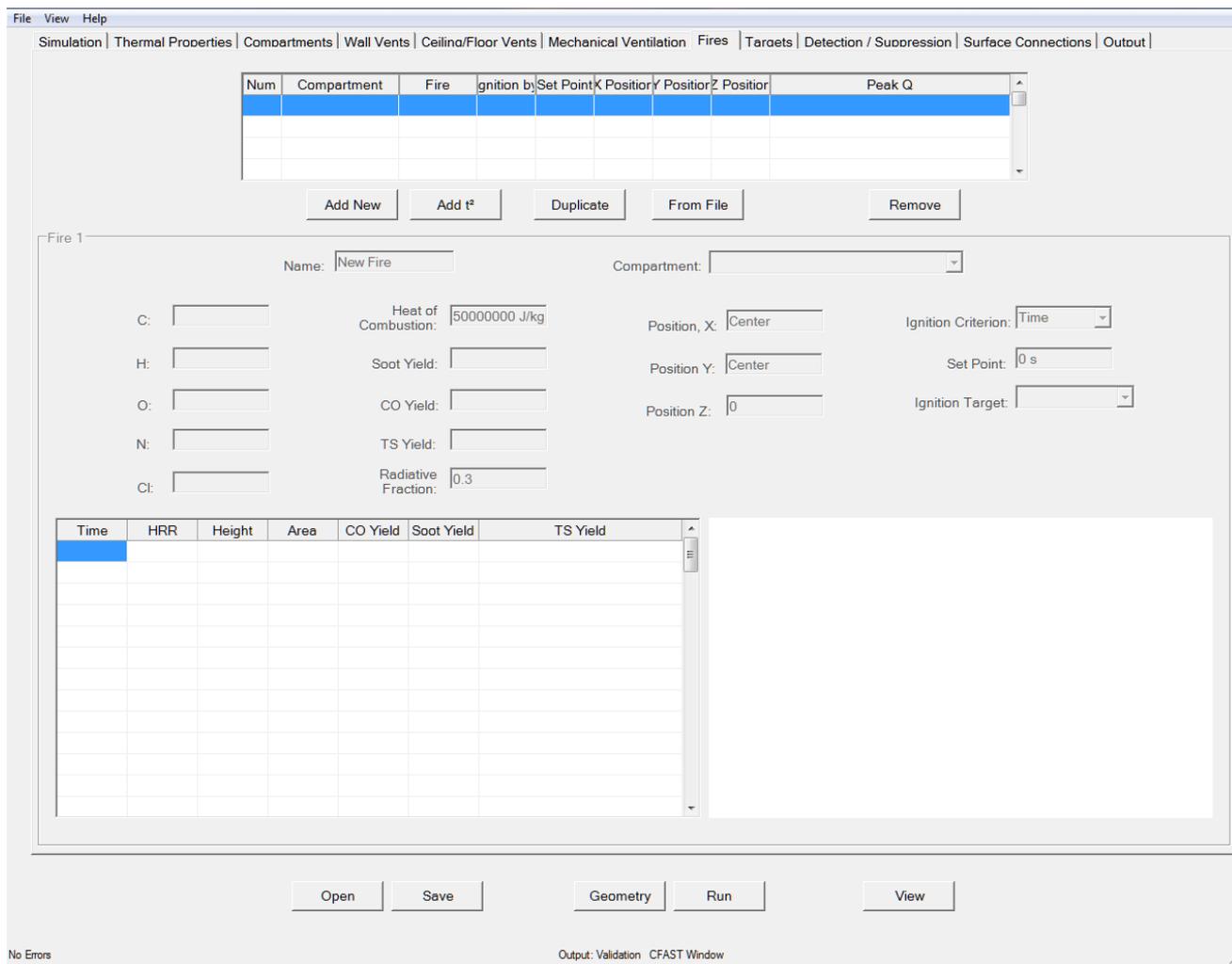
- Доля отверстия, открытая изначально.
- Время изменения состояния отверстия.
- Доля отверстия, открытая в конце.

Это означает, что в заданный момент времени отверстие изменит свое состояние

В большинстве случаев используются состояния «0» – закрытое отверстие и «1» – открытое отверстие.

### Источник пожара

После того как задана геометрия, указаны все отверстия с размерами и расположением, остается только задать источник пожара. Это возможно перейдя на вкладку «Fires».



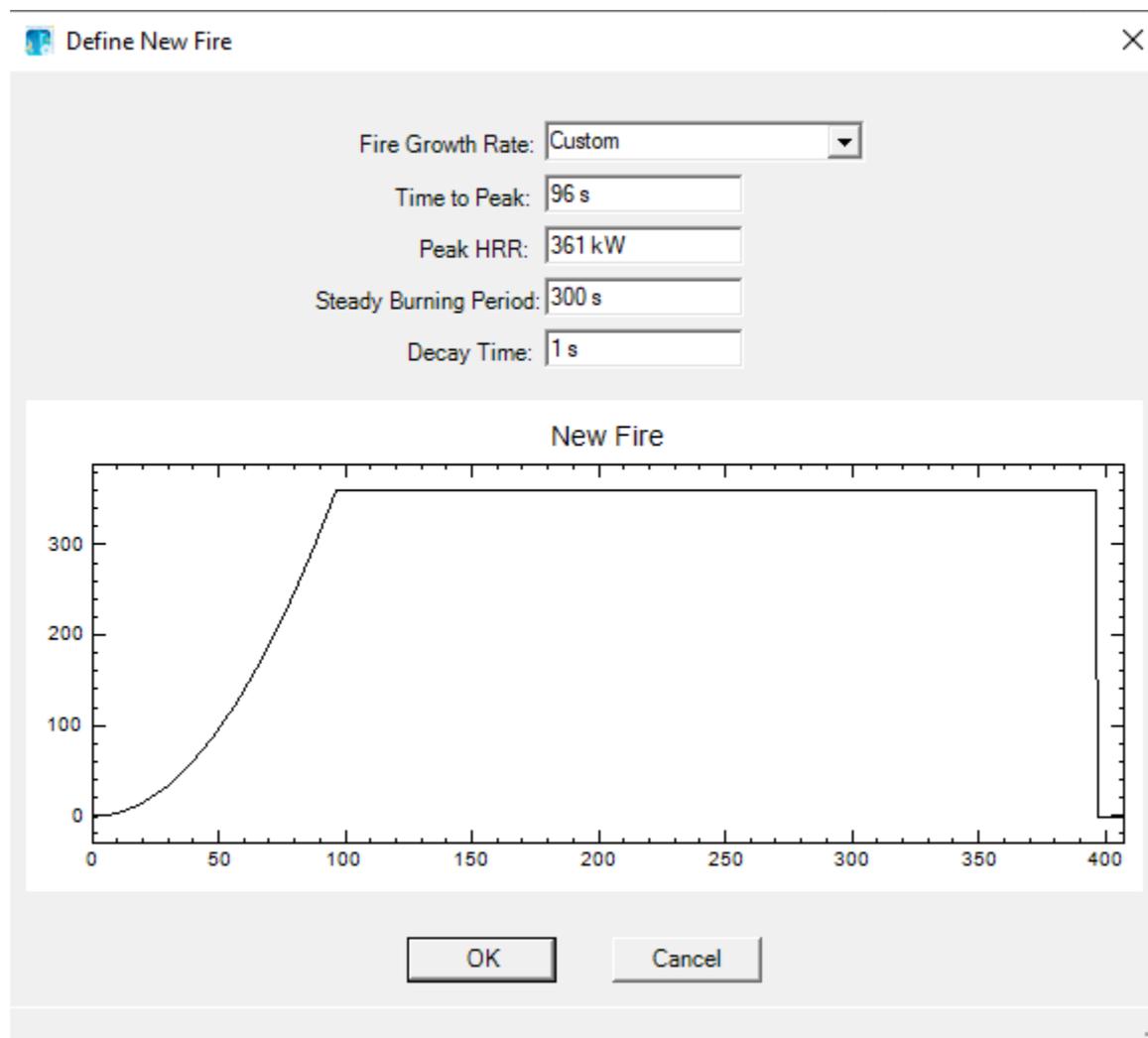
В качестве примера смоделируем пожар, где в качестве пожарной нагрузки примем типовую нагрузку для «Тара: древесина+картон+полистирол (0,5+0,25+0,25)». Исходные данные для расчета приведены в приложении 1.

### Описание источника пожара

Кнопка (Add t<sup>2</sup>) создает новый источник пожара с квадратичным развитием.

Создадим квадратичный источник пожара с параметрами, описанными в начале главы: максимальная скорость тепловыделения (Peak HRR) 362 кВт, время развития до 1МВт (time to Peak) – 96 секунд, период затухания (Decay Time) – 1 секунда.

Величину максимальной скорости тепловыделения (Peak HRR) определяется по приложению 1 в столбце HRR.



Нажав кнопку «ОК» вернемся к описанию источника.

Рассмотрим параметры группы Details.

Доля излучения (radiative fraction) характеризует долю энергии, отводимую от источника пожара при помощи излучения, если нет дополнительной информации, обычно принимается как 0.3.

Теплоту сгорания (heat of combustion) задайте равной низшей теплоте сгорания  $H_f$ .

В ячейки с указанием соответствующих атомов в горючем указывать в соответствии с соотношениями:

$$C = V_{CO_2} + V_C + V_{CO}, \quad (4.56)$$

$$H = V_{HCl} + \frac{V_{H_2O}}{2}, \quad (4.57)$$

$$O = \frac{(V_{CO_2} + V_{CO} + V_{H_2O})}{2} - V_{O_2}, \quad (4.58)$$

$$N = 0, \quad (4.59)$$

$$HCl = V_{HCl}, \quad (4.60)$$

где

$V_{CO}$  – количество киломолей CO (приведенные в приложении 2);

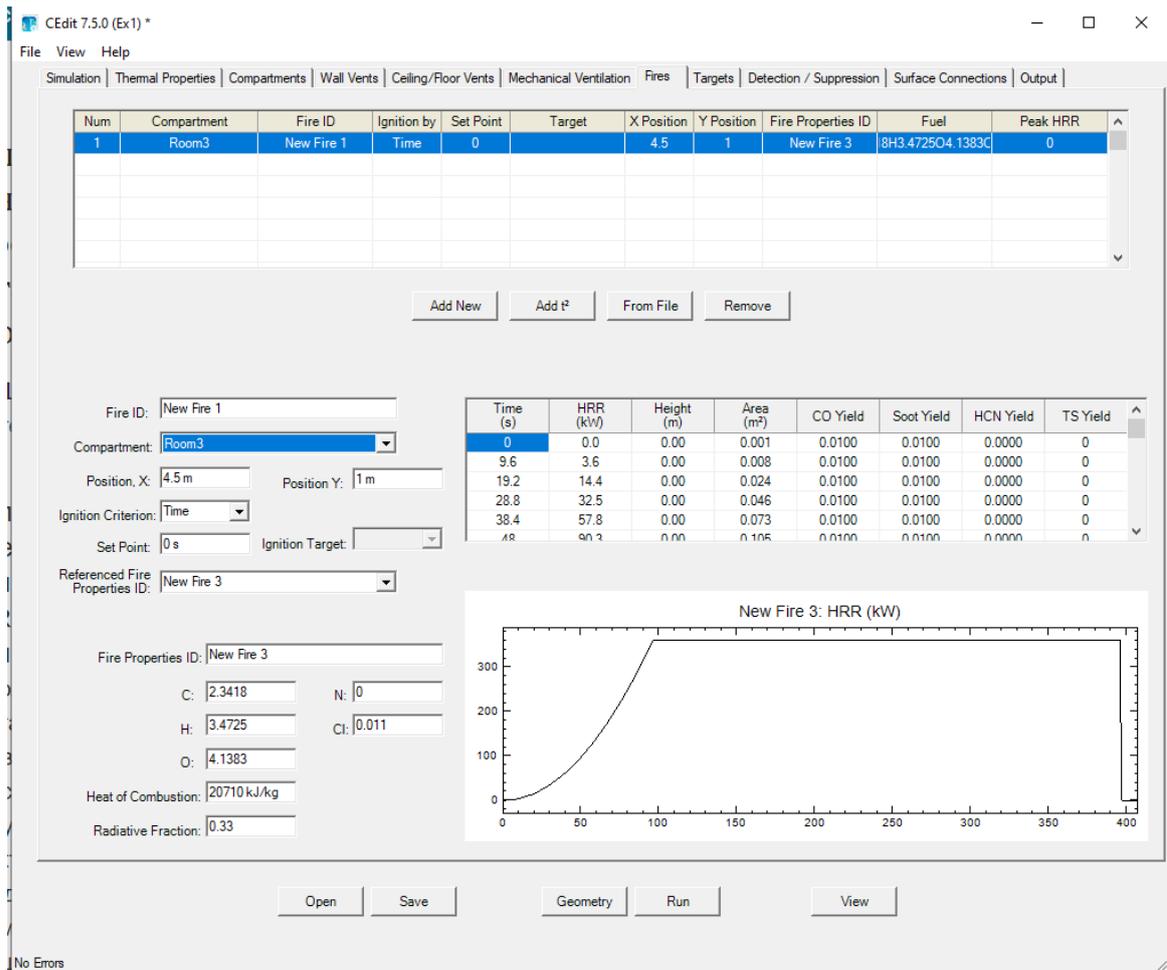
$V_{CO_2}$  – количество киломолей  $CO_2$  (приведенные в приложении 2);

$V_C$  – количество киломолей C (приведенные в приложении 2);

$V_{HCl}$  – количество киломолей HCl (приведенные в приложении 2);

$V_{H_2O}$  – количество киломолей  $H_2O$  (приведенные в приложении 2);

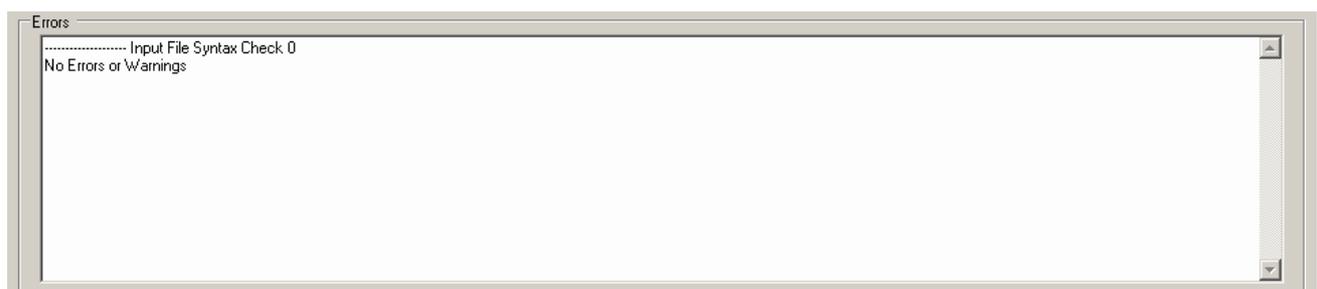
$V_{O_2}$  – количество киломолей  $O_2$  (приведенные в приложении 2);



Выберем источник пожара следующим образом:

- Источник пожара располагается в помещении Room\_3 и занимает всю площадь помещения.
- Параметры источника зададим как Тара: древесина+картон+полистирол (0,5+0,25+0,25).
- Пожар начинается в центре помещения и распространяется радиально.

### Errors (Ошибки)



В этом окне CFAST сообщает обо всех ошибках и предупреждениях. В случае наличия ошибок расчет просто не запустится.

Кроме того, о количестве и сути ошибок CFAST пишет в левом нижнем углу и внизу окна.

### Обработка результатов

Визуализация результатов изменения температуры, уровня слоя дыма и потоков воздуха осуществляется в программе Smokeview.

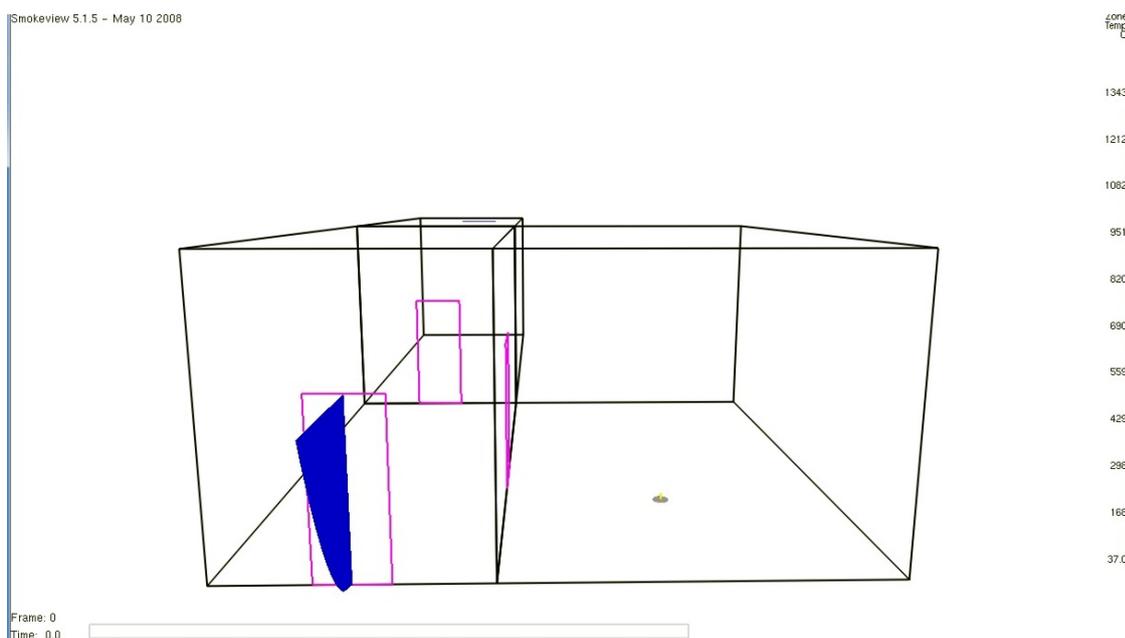


Рисунок 15 – Визуализация помещений в Smokeview

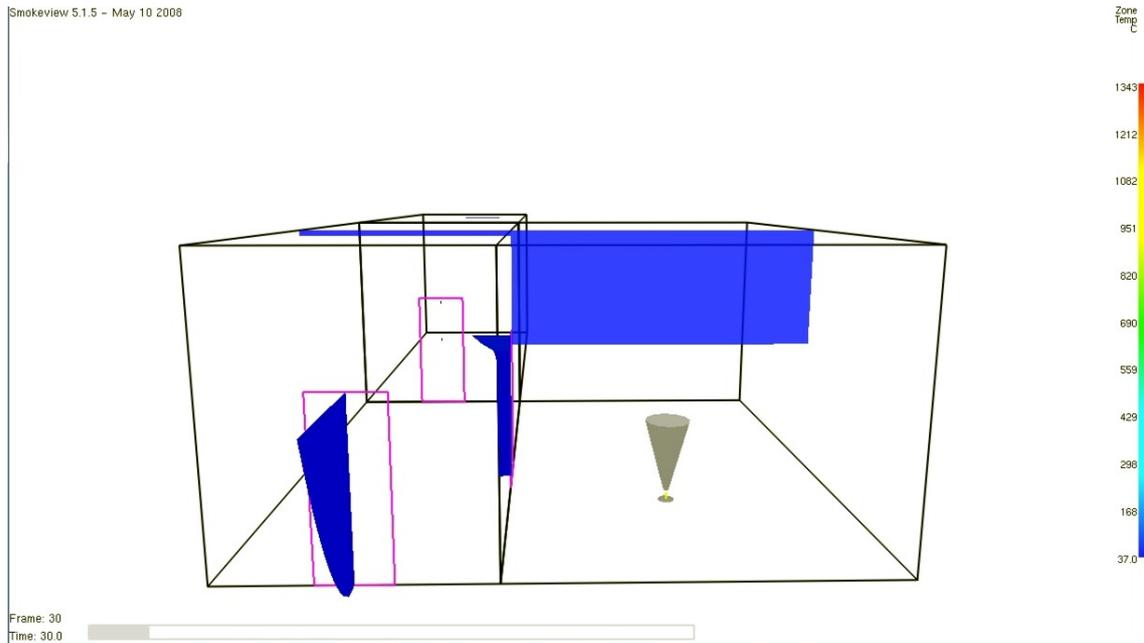


Рисунок 16 – Изменение температуры в помещениях на 30 с после начала возгорания

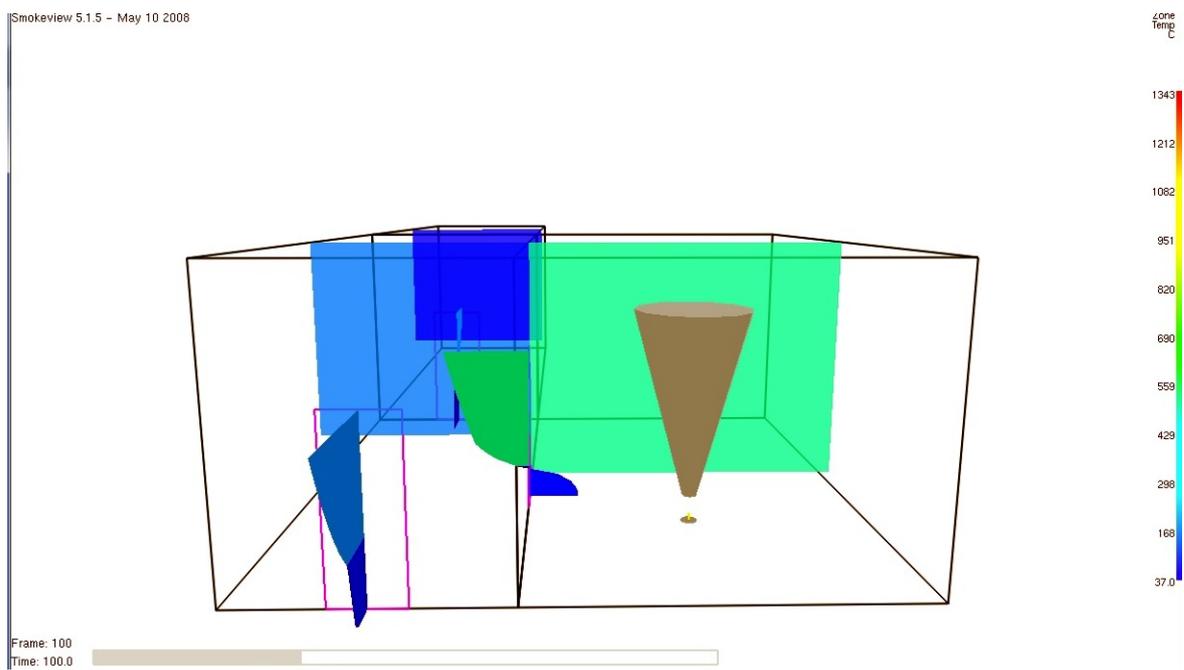


Рисунок 17 - Изменение температуры в помещениях на 100 с после начала возгорания

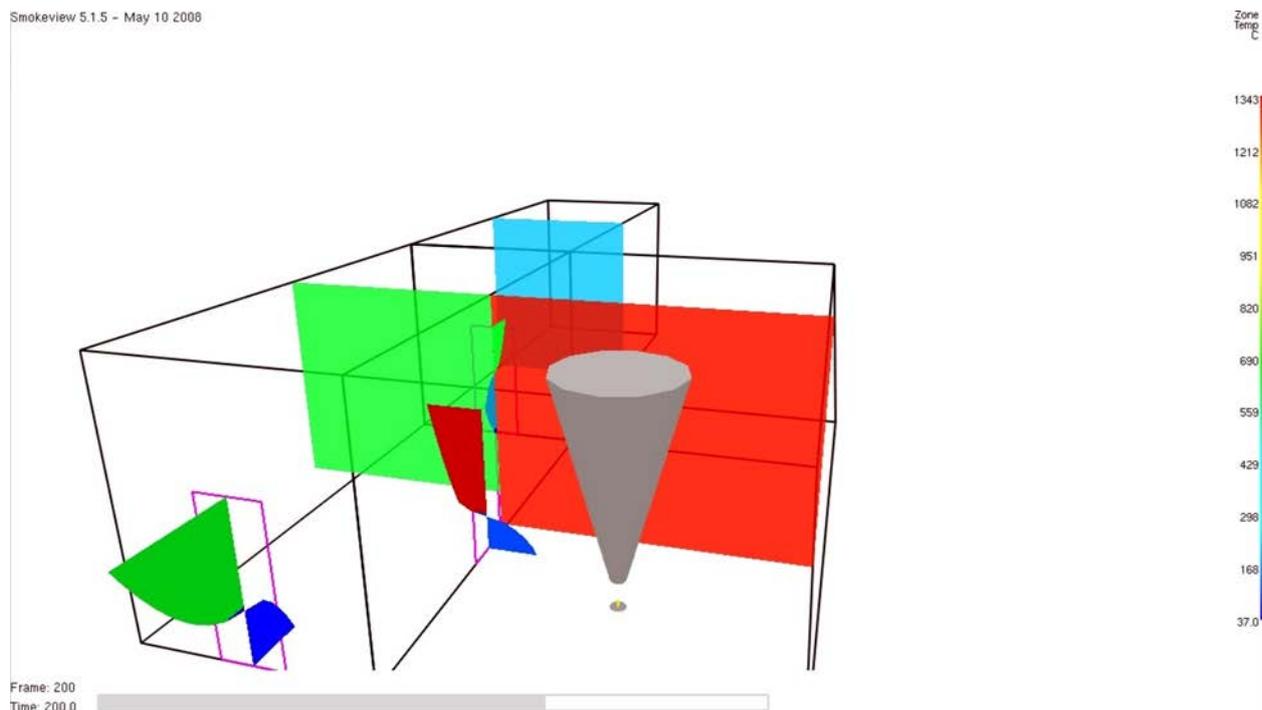


Рисунок 18 - Изменение температуры в помещениях на 200 с после начала возгорания

На рисунках 17 и 18 видно, как изменяется температура в комнатах с течением времени. На 100 секунде температура помещения, где находится источник пожара, повысилась до 450-550 °С, а температура в соседних комнатах повысилась до 100-200 °С, на 200 секунде температура в помещении повысилась до 1000 °С, так же повышение температуры произошло и в соседних помещениях: до 400-500 °С. Происходит бурное развитие процесса горения.

### **Численная обработка результатов**

Численная информация находится в файлах \*.csv. Это файлы с Excel с разделителями-запятыми. Чтобы файл открылся в «нормальном» табличном виде, импортируйте выбранный файл в Excel (Данные -> Импорт внешних данных -> Импортировать данные), указав в качестве разделителя колонок запятую.

Всего CFAST создает ряд файлов в формате электронной таблицы:

1. project\_compartments.csv - содержит температуру и высоту слоя нейтральной зоны, концентрации газов и тепловыделения по помещениям.

2. project\_devices.csv - содержит информацию по целям и детекторам;

3. project\_masses.csv – содержит массу компонентов в слоях отсеков

4. project\_vents.csv – содержит данные о вентиляционных проемах;

5. project\_walls.csv – содержат температуру поверхностей в помещениях.

Нас интересует значение опасных факторов на высоте рабочей зоны (1.7 метров). Для каждого опасного фактора мы имеем значение верхнем и в нижнем слоях.

Поэтому изменение значения опасного фактора на высоте рабочей зоны будем определять следующим образом:

- если высота дымового слоя больше высоты рабочей зоны, значение опасного фактора на высоте рабочей зоны принимается равным значению фактора в нижнем слое;

- если высота дымового слоя меньше высоты рабочей зоны, значение опасного фактора на высоте рабочей зоны принимается равным значению фактора в верхнем слое.

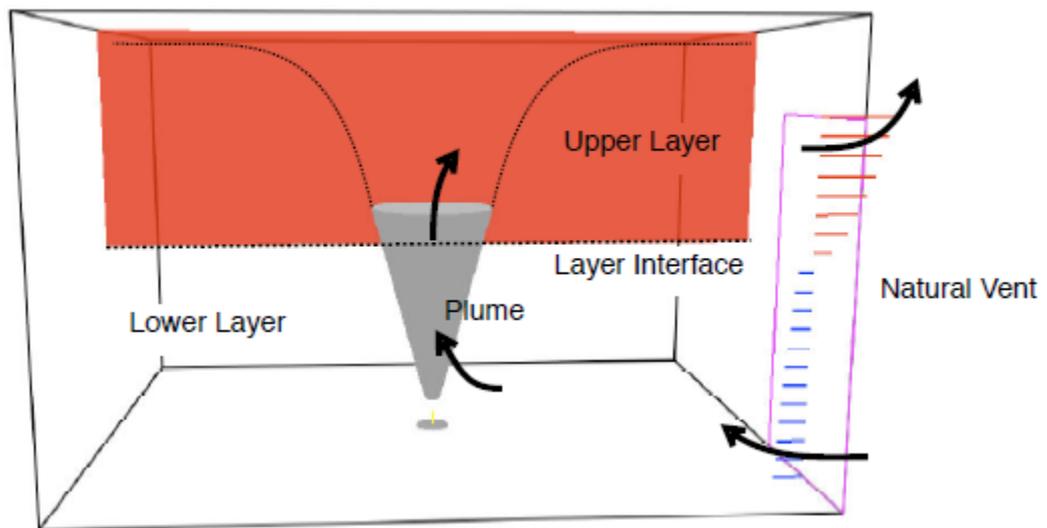
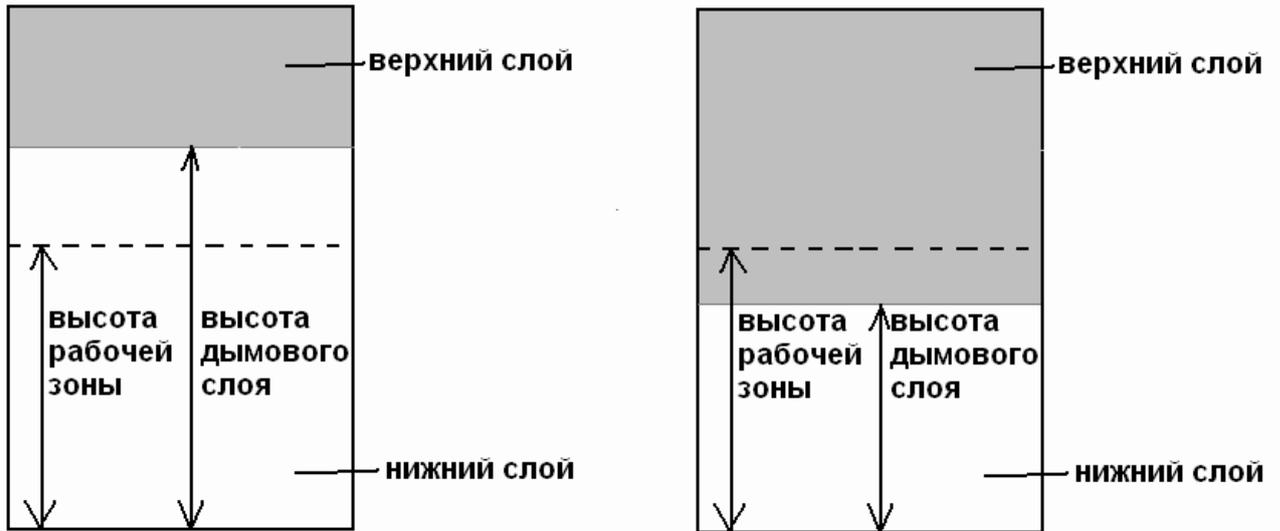


График опасного фактора, например, температуры, будет иметь следующий вид:

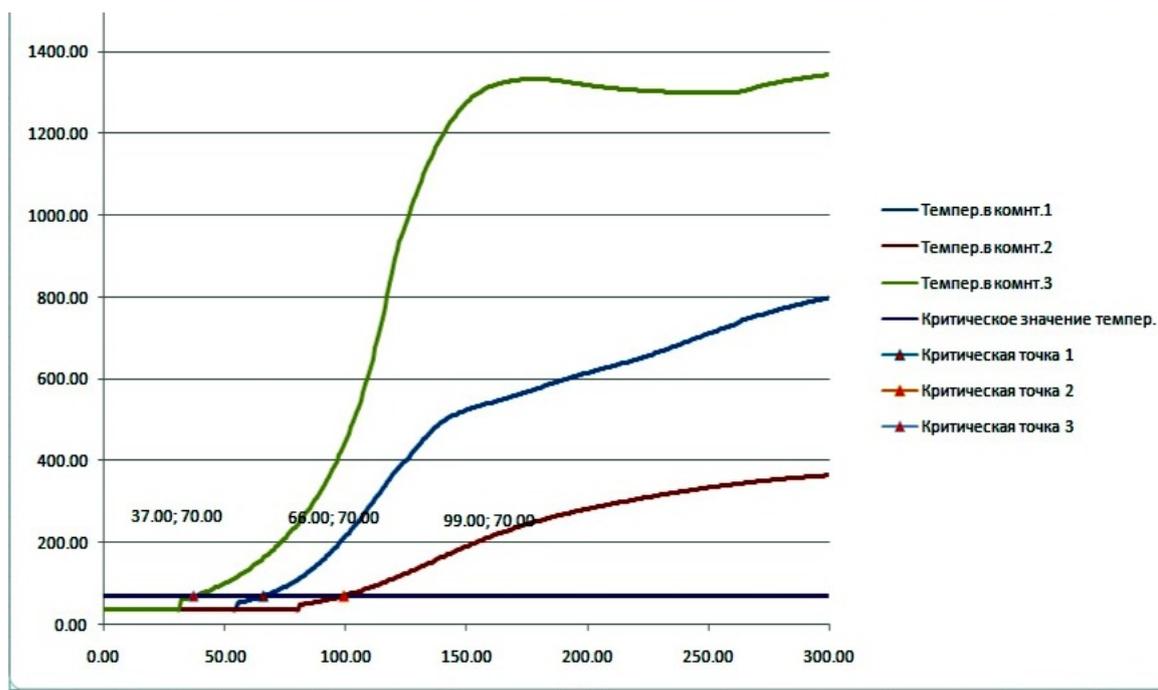


Рисунок 19 – Изменение температуры в помещениях с течением времени

Значение параметра на высоте рабочей зоны меняется скачком, когда высота дымового слоя достигает высоты рабочей зоны.

Для каждого опасного фактора пожара определяется предельно допустимое значение, превышение которого на высоте рабочей зоны означает блокирование пути эвакуации по данному фактору.

Критические значения по каждому из опасных факторов составляют:

- по повышенной температуре - плюс 70 °С;
- по тепловому потоку - 1400 Вт/м<sup>2</sup>;
- по потере видимости - 20 м;
- по пониженному содержанию кислорода – 0,226 кг·м<sup>-3</sup>;
- по каждому из токсичных газообразных продуктов горения (СО<sub>2</sub> – 0,11 кг·м<sup>-3</sup>, СО – 1,16·10<sup>-3</sup> кг·м<sup>-3</sup>, НСl - 23·10<sup>-6</sup>).

В файле ex.n.csv нас интересуют три колонки для каждого помещения – 'Upper Layer Temp', 'Lower Layer Temp', 'Layer Height' – то есть температура верхнего слоя, температура нижнего слоя и высота слоя.

Газовые компоненты находятся в файле ex.s.csv. Здесь приведены данные для верхнего и нижнего слоев каждого помещения. Нас интересуют следующие колонки: концентрация кислорода (O<sub>2</sub>), углекислого газа (CO<sub>2</sub>), угарного газа (CO), хлористого водорода (HCL) и оптической плотности (OD).

Необходимо учитывать, что концентрация кислорода и угарного газа измеряется в процентах, а угарного газа и хлористого водорода – в промилле. Оптическая плотность измеряется в обратных метрах.

Численные значения для каждого из опасных факторов пожара приведены в таблице 22, графические зависимости на рисунках 20-24.

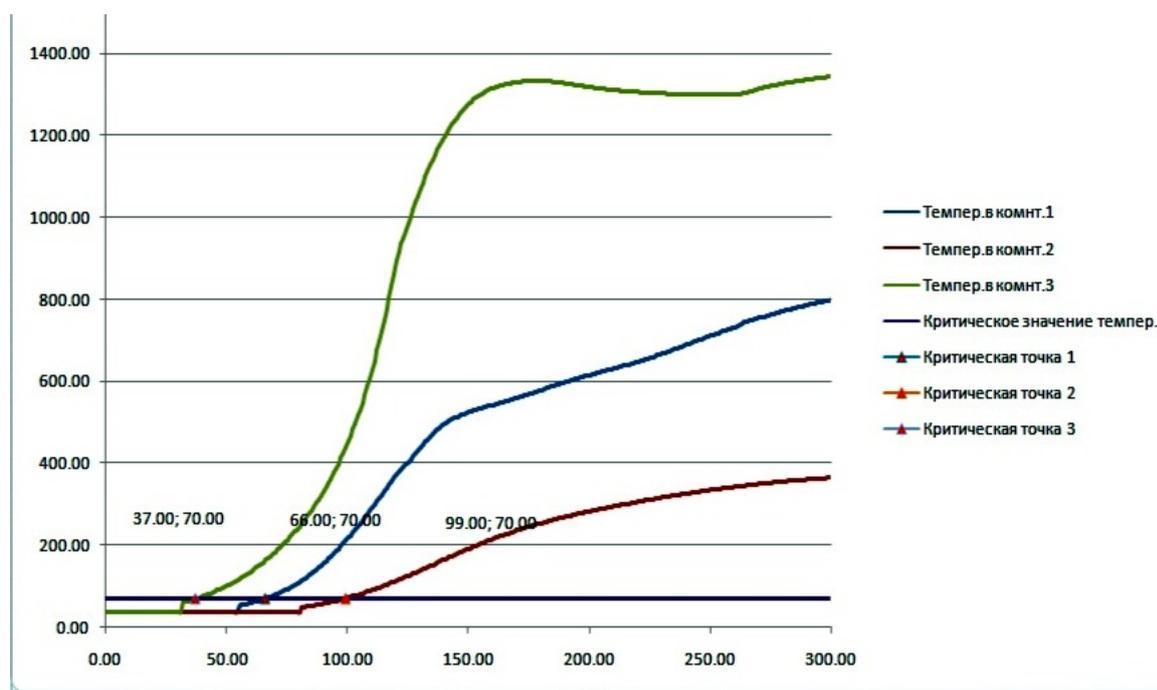


Рисунок 20 - Изменение температуры в помещениях с течением времени

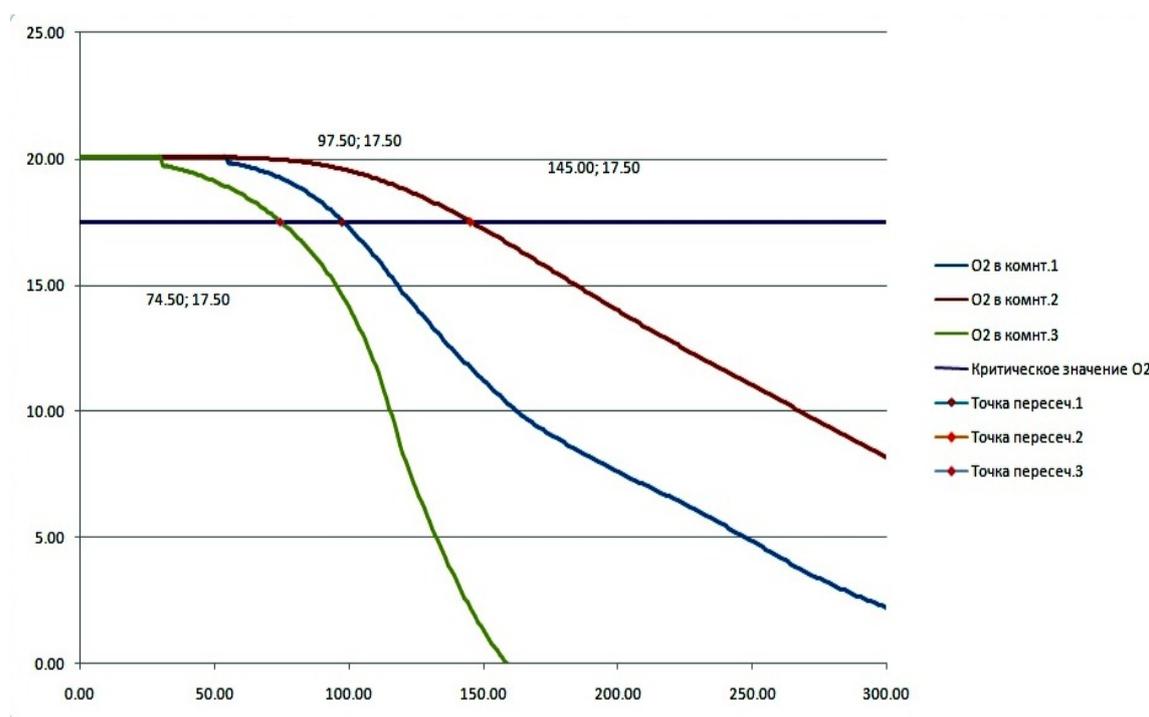


Рисунок 21 - Изменение концентрации кислорода в помещениях с течением времени

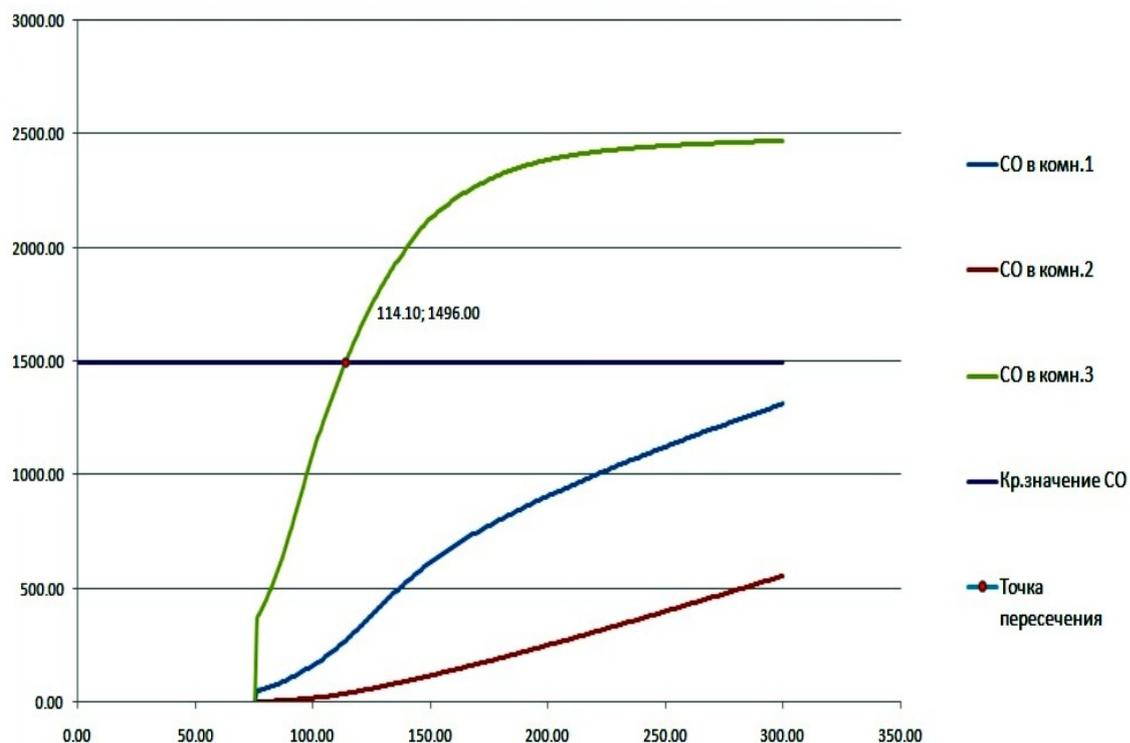


Рисунок 22 - Изменение концентрации угарного газа в помещениях с течением времени

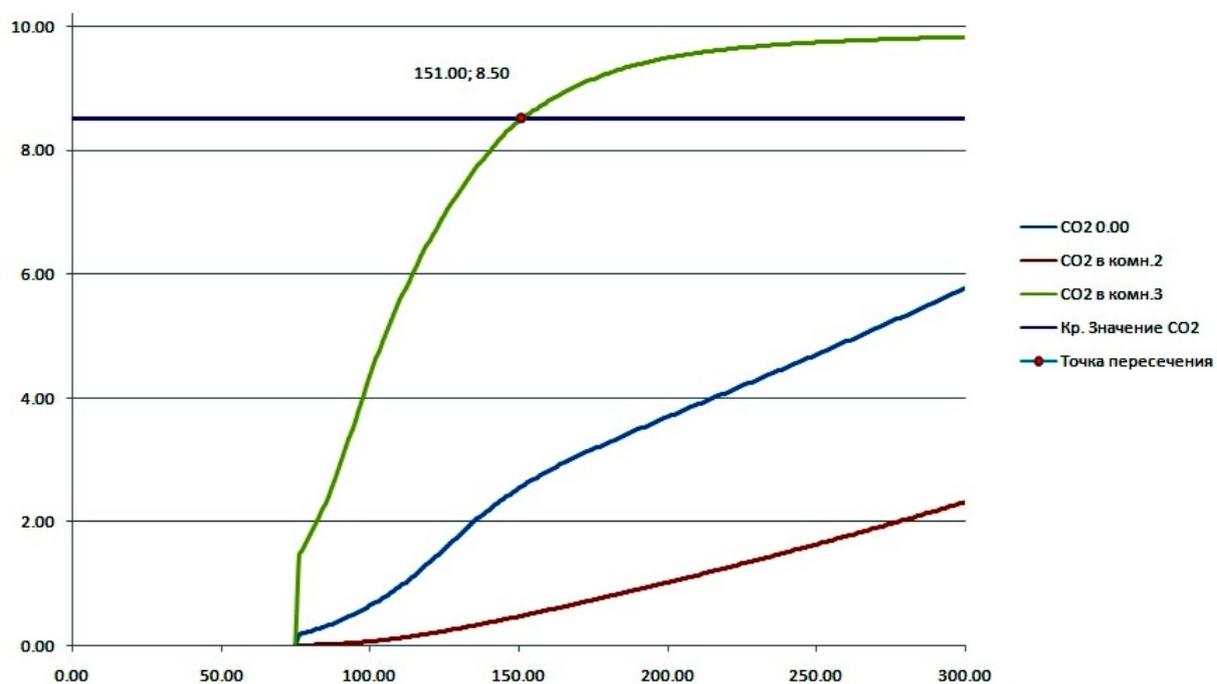


Рисунок 23 - Изменение концентрации углекислого газа в помещениях с течением времени

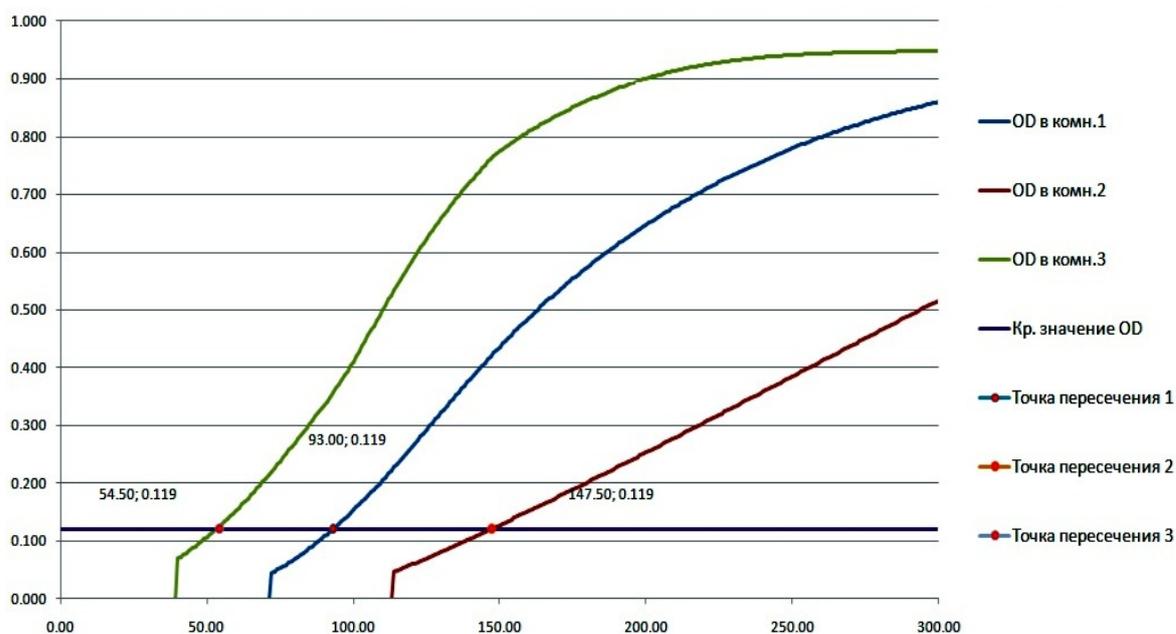


Рисунок 24 - Изменение оптической плотности среды в помещениях с течением времени

Результаты по времени блокирования путей эвакуации опасными факторами пожара сведем в общую таблицу 22.

Таблица 22 – Результаты расчета времени блокирования путей эвакуации

Номер помещения	Время блокирования, с					
	Повышенная температура	Потеря видимости (оптическая плотность)	Пониженное содержание кислорода	Повышенное содержание углекислого газа	Повышенное содержание угарного газа	Повышенное содержание хлороводорода
Комната 1	66,0	93,0	97,5	>300,0	>300,0	$\infty$
Комната	99,0	147,5	145,0	>300,0	>300,0	$\infty$

Номер	Время блокирования, с					
2						
Комната 3	37	54,5	74,5	151,0	114,1	$\infty$

#### 4.3 Расчет избыточного давления взрыва при пожаре в здании

Расчет избыточного давления взрыва является основным расчетом для определения категории помещения и здания по взрывопожарной и пожарной опасности.

При расчете значений критериев взрывопожарной опасности в качестве расчетного следует выбирать наиболее неблагоприятный вариант аварии или период нормальной работы аппаратов, при котором во взрыве участвует наибольшее количество веществ или материалов, наиболее опасных в отношении последствий взрыва.

В случае если использование расчетных методов не представляется возможным, допускается определение значений критериев взрывопожарной опасности на основании результатов соответствующих научно-исследовательских работ, согласованных и утвержденных в установленном порядке.

Количество поступивших в помещение веществ, которые могут образовать взрывоопасные газоздушные или паровоздушные смеси, определяется исходя из следующих предпосылок:

- а) происходит расчетная авария одного из аппаратов максимальной емкости, в котором обращается наиболее опасное вещество;
- б) все содержимое аппарата поступает в помещение;
- в) происходит одновременно утечка веществ из трубопроводов, питающих аппарат, по прямому и обратному потокам в течение времени, необходимого для отключения трубопроводов.

Расчетное время отключения трубопроводов определяется в каждом конкретном случае исходя из реальной обстановки и должно быть минимальным с учетом паспортных данных на запорные устройства, характера технологического процесса и вида расчетной аварии. Расчетное время отключения трубопроводов следует принимать равным:

- времени срабатывания системы автоматики отключения трубопроводов согласно паспортным данным установки, если вероятность отказа системы автоматики не превышает 0,000001 в год или обеспечено резервирование ее элементов;
- 120 с, если вероятность отказа системы автоматики превышает 0,000001 в год и не обеспечено резервирование ее элементов;
- 300 с при ручном отключении.

Под “временем срабатывания” и “временем отключения” следует понимать промежуток времени от начала возможного поступления горючего вещества из трубопровода (перфорация, разрыв, изменение номинального давления и т. п.) до полного прекращения поступления газа или жидкости в помещение.

г) происходит испарение с поверхности разлившейся жидкости; площадь испарения при разливе на пол определяется (при отсутствии справочных данных) исходя из расчета, что 1 л смесей и растворов, содержащих 70 % и менее (по массе) растворителей, разливается на площади 0,5 м<sup>2</sup>, а остальных жидкостей – на 1 м<sup>2</sup> пола помещения;

д) происходит также испарение жидкости из емкостей, эксплуатируемых с открытым зеркалом жидкости, и со свежеокрашенных поверхностей;

е) длительность испарения жидкости принимается равной времени ее полного испарения, но не более 3600 с.

Свободный объем помещения определяется как разность между объемом помещения и объемом, занимаемым технологическим оборудованием. Если свободный объем помещения определить невозможно, то его допускается принимать условно равным 80% геометрического объема помещения.

Избыточное давление взрыва является основным критерием, разделяющим взрывоопасные категории помещений от пожароопасных.

В результате действия поражающих факторов взрыва происходит разрушение или повреждение зданий, сооружений, технологического оборудования, транспортных средств, элементов коммуникаций и других объектов, гибель людей. В таблице 23 представлены степени поражения в результате взрывов в зависимости от их избыточного давления.

Таблица 23 - Степень поражения в результате взрывов в зависимости от их избыточного давления

Степень поражения	Избыточное давление, кПа
Полное разрушение зданий	100
50 %-ное разрушение зданий	53
Средние повреждения зданий	28
Умеренные повреждения зданий (повреждение внутренних перегородок, рам, дверей и т.п.)	12
Нижний порог повреждения человека волной давления	5
Малые повреждения (разбита часть остекления)	3

Этот показатель, главным образом, зависит от массы вещества, которое поступает в аварийное помещение, и доли ее, принимающей участие во взрыве.

Определение поступающей в помещение массы вещества является одной из предварительных задач, которую необходимо решить перед тем, как определять массу вещества, принимающего участие во взрыве. Алгоритм расчета при этом зависит от агрегатного состояния горючих веществ, их свойств и технологических параметров.

Избыточное давление взрыва в замкнутом помещении - это разность между максимально возможным и начальным давлением, при котором он происходит.

Максимальное давление достигается, если

- вся масса горючего, поступившего в помещение, примет участие в образовании горючей среды и полностью взорвется;
- помещение полностью герметично и в нем отсутствует теплоотвод через ограничивающие поверхности (неадиабатический процесс);
- горючее и окислитель в горючей среде находятся в стехиометрическом соотношении.

В реальных условиях максимальное давление взрыва не достигается, так как имеются существенные отклонения. При расчете это необходимо учитывать, поэтому формулы для расчета  $\Delta P$  индивидуальных веществ и смесей имеют более сложный вид.

Расчет избыточного давления взрыва для индивидуальных веществ производится согласно **ГОСТ Р 12.3.047 – 2012** и **СП 12.13130.2009**.

Избыточное давление взрыва  $\Delta P$  для индивидуальных горючих веществ (газов и паров ЛВЖ и ГЖ), состоящих из атомов С, Н, О, N, Cl, Br, I, F, определяется по формуле

$$\Delta P = (P_{\max} - P_0) \frac{m \cdot Z}{V_{св} \cdot \rho_{z(n)}} \cdot \frac{100}{C_{смex}} \cdot \frac{1}{K}, \quad (4.61)$$

где

$P_{MAX}$  - максимальное давление взрыва стехиометрической газозвушной и паровоздушной смесив замкнутом объеме. Определяется экспериментально или по справочным данным. При отсутствии данных допускается принимать  $P_{MAX} = 900$  кПа.

$P_0$  - начальное давление, кПа. Допускается принимать равным 101 кПа.

$m$  - масса горючего газа или паров ЛВЖ и ГЖ, вышедших в результате аварии в помещение.

$Z$  - коэффициент участия горючего во взрыве. Допускается принимать значение  $Z$  по таблице 24.

$V_{CB}$  - свободный объем помещения, м<sup>3</sup>. Свободный объем помещения определяется как разность между объемом помещения и объемом, занимаемым технологическим оборудованием. Если свободный объем помещения определить невозможно, то его допускается принимать равным 80 % геометрического объема помещения.

Таблица 24 - Значение коэффициента  $Z$  для различных видов горючего

Вид горючего	Значение
Водород	1,0
Горючие газы (кроме водорода), пыли	0,5
Легковоспламеняющиеся и горючие жидкости, нагретые до температуры вспышки и выше	0,3
Легковоспламеняющиеся и горючие жидкости, нагретые ниже температуры вспышки, при наличии возможности образования аэрозоля	0,3
Легковоспламеняющиеся и горючие жидкости, нагретые ниже температуры вспышки, при отсутствии возможности образования аэрозоля	0

$\rho_G$  - плотность газа или пара при расчетной температуре  $t_{РАСЧ}$ , кг/м<sup>3</sup>.

Если принять, что давление в помещении равно нормальному атмосферному давлению (101,3 кПа) то плотность газа или пара можно рассчитать по формуле (4.9):

$C_{СТЕХ}$  - стехиометрическая концентрация горючих газов или паров ЛВЖ и ГЖ, % (объемных).

$K_H$  - коэффициент, учитывающий негерметичность помещения и неадиабатичность процесса горения. Допускается принимать  $K_H = 3$ .

### Пример 3.3

**Условие:** Вычислить избыточное давление взрыва в помещении, расположенном в городе Санкт-Петербурге, где обращается толуол.

#### 1. Характеристика горючего вещества

Толуол  $C_6H_5CH_3$  - метилбензол. Температура вспышки  $t_{всп} = -5$  °С.

Нижний концентрационный предел распространения пламени

НКПР = 1,21 %

Константы уравнения Антуана

$A = 6,0507$ ;  $B = 1328,17$ ;  $C = 217,713$ .

Плотность жидкости  $\rho_{ж} = 867$  кг/м<sup>3</sup>.

Максимальное давление взрыва паров толуола  $P_{MAX} = 634$  кПа.

#### 2. Характеристика помещения

Длина  $l = 18$  м,

ширина  $b = 12$  м,

высота  $h = 6$  м.

Максимальная температура воздуха в помещении 37 °С (СП «Строительная климатология»), повышение температуры в результате аварии, а также образования аэрозоля невозможно.

Скорость воздушного потока в помещении 0,1 м/с.

#### 3. Характеристика оборудования и параметры технологического процесса

Объем аппарата  $V_{АП} = 0,05$  м<sup>3</sup>.

Степень заполнения аппарата жидкостью  $\varepsilon = 0,85$ .

В результате аварийной ситуации аппарат полностью разрушен, вся жидкость поступила в помещение. Испарение жидкости проходило в течение 1 часа.

Решение:

Количество жидкости, которое поступит в помещение определено  $m_{АП}$ .

Объем жидкости:

$$V = \varepsilon \cdot V_{ам} = 0,85 \cdot 0,05 = 0,0425 \text{ м}^3 = 42,5 \text{ л}$$

Масса жидкости:

$$m = \varepsilon \cdot V_{ам} \cdot \rho_{ж} = 0,85 \cdot 0,05 \cdot 867 = 37 \text{ кг}$$

2. Площадь испарения жидкости определена в соответствии с п.А.1.2 (г) СП 12.13130.2009 с учетом того, что происходит испарение с поверхности разлившейся жидкости; площадь испарения при разливе на пол определяется (при отсутствии справочных данных) исходя из расчета, что 1 л смесей и растворов, содержащих 70 % и менее (по массе) растворителей, разливается на площади  $0,5 \text{ м}^2$ , а остальных жидкостей – на  $1 \text{ м}^2$  пола помещения:

$$S_{исп} = 42,5 \text{ м}^2$$

3. Интенсивность испарения  $W_{исп}$  определена по формуле (4.5).

При  $25 \text{ }^{\circ}\text{C}$  и  $\omega_{возд} = 0,1 \text{ м/с}$ , коэффициент эта  $\eta = 2,1$ .

Молярная масса толуола  $\text{C}_6\text{H}_5\text{CH}_3$   $M = 92 \text{ кг/кмоль}$ .

Давление насыщенного пара толуола определяем по уравнению Антуана при температуре  $37^{\circ}\text{C}$ .

Сначала проверено для каких размерностей давления определены коэффициенты Антуана, подставляя в уравнение температуру кипения жидкости:

$$P_n^{кин} = 10^{6,0507 - \frac{1328,17}{217,713+110}} = 101$$

Следовательно коэффициенты Антуана определены для размерности давления в кПа

Давление насыщенных паров при 37°C:

$$P_H^{34} = 10^{\left(6,0507 - \frac{1328,17}{217,713+34}\right)} = 5,6 \text{ кПа.}$$

Тогда интенсивность испарения будет равна

$$W_{ИСП} = 10^{-6} \cdot 2,1 \cdot \sqrt{92} \cdot 5,6 = 111,4 \cdot 10^{-6} \text{ кг/м}^2 \cdot \text{с.}$$

4. Определяем массу жидкости, испарившейся с поверхности разлива  $m_{ИСП}$

Расчетное время испарения принимаем  $\tau_{РАСЧ} = 3600 \text{ с.}$

$$m_{ИСП \text{ жидк}} = W \cdot S \cdot \tau = 111,4 \cdot 10^{-6} \cdot 42,5 \cdot 3600 = 17 \text{ кг}$$

**Примечание:** Бывают случаи, когда рассчитанная таким образом масса паров превышает массу жидкости. Это говорит о том, что жидкость испарится полностью менее чем за час. В этом случае расчетная масса паров принимается равной массе жидкости.

5. Избыточное давление при взрыве паров толуола определяем по формуле:

$$\Delta P = (P_{МАХ} - P_0) \cdot \frac{m \cdot Z}{V_{СВ} \cdot \rho_{Г(П)}} \cdot \frac{100}{C_{СТЕХ}} \cdot \frac{1}{K_H}, \text{ кПа.}$$

Для расчета нам известны следующие величины:

$$P_{МАХ} = 634 \text{ кПа;}$$

$$P_0 = 101 \text{ кПа;}$$

$$m = 17 \text{ кг;}$$

$Z = 0,3$  (по условию нашей задачи толуол - ЛВЖ, нагретая выше температуры вспышки);

$$K_H = 3.$$

Остальные величины  $V_{CB}$ ,  $\rho_{\Gamma}$ ,  $C_{СТЕХ}$  необходимо рассчитать.

6. Определим свободный объем помещения  $V_{CB}$ .

$$V_{CB} = 18 \cdot 12 \cdot 6 \cdot 0,8 = 1036,8 \text{ м}^3.$$

7. Определим плотность паров толуола в помещении  $\rho_{\Gamma}$ .

Температура воздуха в помещении  $t_{PAC} = 34 \text{ }^{\circ}\text{C}$ .

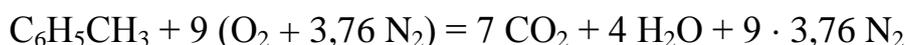
Поскольку атмосферное давление в помещении принимаем равным нормальному атмосферному давлению  $P_0$ , плотность паров можно рассчитать по формуле

$$\rho_{\Gamma} = \frac{92}{22,4 \cdot (1 + 0,00367 \cdot 34)} = 3,65 \text{ кг/м}^3.$$

8. Определим стехиометрическую концентрацию паров толуола  $C_{СТЕХ}$ .

$$C_{СТЕХ} = \frac{100}{1 + 4,76 \cdot \beta}, \%$$

Уравнение реакции горения толуола



$$\beta = 9$$

$$C_{СТЕХ} = 100 / (1 + 4,76 \cdot 9) = 1,86 \%$$

9. Определяем избыточное давление взрыва паров толуола, используя величины, полученные в п.п. 6 - 8.

$$\Delta P = (634 - 101) \cdot \frac{17 \cdot 0,3}{1036,8 \cdot 3,65} \cdot \frac{100}{1,86} \cdot \frac{1}{3} = 12,9 \text{ кПа.}$$

**Вывод:** избыточное давление взрыва при выбранной аварийной ситуации составляет 12.9 кПа.

*Пример 3.4* Помещение площадью 58,41 м<sup>2</sup> и высотой 3,91 м и предназначено для хранения ледозаливочной машины. В помещении предусмотрена система вытяжной вентиляции с кратностью воздухообмена равное 3.

Помещение рассчитано на хранение одной ледозаливочной машины. Согласно данных Заказчика, по технологическим инструкциям, ледозаливочная машина находится в помещении с запасом топлива 41,6 литров.

Из находящейся на участке горючей нагрузки наибольшую опасность может представлять бензин, находящийся в баке ледозаливочной машины (не более 41,6 л).

Бензин представляет собой согласно [7] ЛВЖ с температурой вспышки менее 28 °С, поэтому в соответствии с п.5.1 и 5.2 и табл. 1 [10] необходимо проверить принадлежность помещения к взрывопожароопасной категории А.

В качестве расчетной аварийной ситуации следует принять разрушение топливной емкости с бензином одной из машин, испарение бензина и образование в помещении взрывоопасной концентрации паров.

Максимальная температура воздуха в помещении в соответствии с [8] - 37°С.

#### **Характеристика горючего вещества**

Бензин А-95, условная формула C<sub>6,9</sub>H<sub>13,1</sub>. Температура вспышки

$$t_{\text{всп}} = -36^{\circ}\text{C}.$$

Константы уравнения Антуана:

$$A = 5,07020; B = 682,876; C = 222,066.$$

$$\text{Плотность жидкости } \rho_{\text{ж}} = 745 \text{ кг/м}^3.$$

Максимальное давление взрыва паров бензина при отсутствии данных в соответствии с п. А.2.1 [10] принимается  $P_{\text{МАХ}} = 900$  кПа.

### Расчет взрывопожароопасной категории помещения

Согласно п. А.2.5 [10] для расчетного варианта аварии масса паров жидкости, поступившей в помещение, определяется из выражения

$$m = W \cdot F_{\text{и}} \cdot T,$$

где  $m$  — масса жидкости, испарившейся с поверхности разлива, кг;

Расчет  $\Delta P$  для определения категории помещения для смесей (бензин А-95 относится именно к этому классу веществ) производится по формуле п.А.4 [10]:

$$\Delta P = \frac{m \cdot H_T \cdot P_0 \cdot Z}{V_{\text{CB}} \cdot \rho_B \cdot C_P \cdot T_H} \cdot \frac{1}{K_H}, \text{ кПа.}$$

$H_T$  -теплота сгорания бензина  $H_T = 46000$  кДж/кг.

$$Z = 0,3.$$

$V_{\text{CB}}$  - свободный объем помещения:

$$V_{\text{CB}} = 0,8 \cdot 58,41 \cdot 3,91 = 182,7 \text{ [м}^3\text{]}.$$

$\rho_B$  - плотность воздуха до взрыва при начальной температуре  $T_H$ , кг/м<sup>3</sup>.

$$\rho_e = \frac{29}{V_0 \cdot (1 + 0,0037 \cdot t_n)} = \frac{29}{22,4 \cdot (1 + 0,0037 \cdot 37)} = 1,14 \text{ , кг/м}^3, \text{ где}$$

$$C_P = 1,01 \cdot 10^3 \left[ \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \right]$$

$$T_H = 310 \text{ К.}$$

$$K_H = 3.$$

Масса жидкости, которая поступит в помещение из разрушенной емкости  $m_{АП}$ .

$$m_{АП} = 41,6 \cdot 0,745 = 31,0 \quad [кг].$$

В соответствии с п. А.2.3 [10] допускается учитывать постоянно работающую общеобменную вентиляцию, обеспечивающую концентрацию горючих газов и паров в помещении, не превышающую предельно допустимую взрывобезопасную концентрацию, рассчитанную для аварийной вентиляции. При этом массу  $m_{АП}$  паров легковоспламеняющихся жидкостей, нагретых до температуры вспышки и выше, поступивших в объем помещения, следует разделить на коэффициент  $K$ , определяемый по формуле (А.5) :

$$K = A \cdot T + 1 = 3 + 1 = 4 \quad [кг]$$

$$m = \frac{m_{АП}}{K} = \frac{31,0}{4} = 7,75 \quad [кг]$$

Площадь разлива жидкости  $F_{РАЗЛИВА}$ .

Коэффициент растекаемости для бензина А-95  $f = 1000$

$$F_{РАЗЛИВА} = 41,6 \text{ м}^2.$$

Площадь испарения жидкости:  $S_{ИСПАР} = F_{РАЗЛИВА} = 41,6 \text{ м}^2$ .

Расчет интенсивности испарения  $W_{ИСП}$ .

Принимаем скорость воздушного потока в помещении при работающей вентиляции равной  $6,4 \cdot 10^{-3}$  м/с.

По таблице А.2 [3] определяем коэффициент  $\eta$  при  $37^\circ\text{C}$  и скорости воздушного потока  $6,4 \cdot 10^{-3}$  м/с.  $\eta = 1,01$ .

Средняя молекулярная масса бензина составляет  $97,2$  г/моль.

Давление насыщенного пара бензина определяем по уравнению

Антуана. В качестве температуры жидкости  $t_{ж}$  принимаем максимально возможную температуру воздуха в помещении.

$$P_s = 10^{\left(5.0702 - \frac{682,876}{222,066 + 37}\right)} = 33,67 \text{ кПа}$$

$$W = 10^{-6} \cdot \eta \cdot \sqrt{M} \cdot P_s = 10^{-6} \cdot 1,01 \cdot \sqrt{97,2} \cdot 33,67 = 335,27 \cdot 10^{-6} \frac{\text{кг}}{\text{м}^2 \cdot \text{с}}$$

Расчетное время испарения  $\tau_{РАСЧ}$ .

Время полного испарения бензина составит:

$$\tau_{исп} = \frac{m}{W \cdot S_{исп}} = \frac{7,75}{335,27 \cdot 10^{-6} \cdot 41,6} = 555,7 \text{ с}$$

это менее 3600, следовательно, расчетное время испарения принимаем  $\tau_{РАСЧ} = 555,7$  с. Расчетная масса испарившейся жидкости составляет 7,75 кг.

Избыточное давление взрыва составит:

$$\Delta P = \frac{7,75 \cdot 46 \cdot 10^6 \cdot 101 \cdot 0,3}{182,7 \cdot 1,14 \cdot 1,01 \cdot 10^3 \cdot 310 \cdot 3} = 55,2 \text{ кПа}$$

## 5 ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Таблица 25 – Справочные данные для расчета ОФП в помещении [11]

№	Источник пожара	Справочные данные								Расчетные данные для CFAST					Расчетные данные для FDS CFAST						
		H <sub>f</sub>	v	ψ	D <sub>m</sub>	L <sub>O2</sub>	L <sub>CO2</sub>	L <sub>CO</sub>	L <sub>HCl</sub>	Peak HRR	t	CO/CO2	C/CO2	HCl	V <sub>c</sub>	V <sub>O2</sub>	V <sub>CO2</sub>	V <sub>CO</sub>	V <sub>HCl</sub>	V <sub>H2O</sub>	V <sub>N2</sub>
1	Здание I-II ст. огнест.; мебель + бытовые изделия	13,8	0,0108	0,0145	270	1,03	0,203	0,0022	0,014	186	121	0,011	0,194	0,014	0,2251	2,8042	0,4018	0,0068	0,0335	8,6066	10,5492
2	Здание I-II ст. огнест.; мебель + ткани	14,7	0,0108	0,0145	82	1,437	1,285	0,0022	0,006	198	117	0,002	0,009	0,006	0,0684	3,9123	2,5437	0,0068	0,0143	5,4856	14,7177
3	Здание III-IV ст. огнест.; мебель + бытовые изделия	13,8	0,0465	0,0344	270	1,03	0,203	0,0022	0,014	441	18	0,011	0,194	0,014	0,2251	2,8042	0,4018	0,0068	0,0335	8,6066	10,5492
4	Здание III-IV ст. огнест.; мебель + ткани	14,7	0,0465	0,0344	82	1,437	1,285	0,0022	0,006	470	18	0,002	0,009	0,006	0,0684	3,9123	2,5437	0,0068	0,0143	5,4856	14,7177
5	Здание I ст. огнест.; мебель + ткани (0,75 + 0,25)	14,9	0,0125	0,0162	58,5	1,437	1,32	0,0193	0	224	95	0,015	0,006	0	0,0488	3,9123	2,6130	0,0600	0	5,2758	14,7177
6	Здание III ст. огнест.; мебель + ткани (0,75 + 0,25)	14,9	0,04	0,0162	58,5	1,437	1,32	0,0193	0	224	30	0,015	0,006	0	0,0488	3,9123	2,6130	0,0600	0	5,2758	14,7177
7	Кабинет; мебель + бумага (0,75 + 0,25)	14	0,042	0,0129	53	1,161	0,642	0,0317	0	168	33	0,049	0,012	0	0,0442	3,1609	1,2709	0,0986	0	7,1628	11,8910
8	Помещение, облицованное панелями; панели ДВП	18,1	0,0405	0,0143	130	1,15	0,686	0,0215	0	241	28	0,031	0,028	0	0,1084	3,1309	1,3580	0,0669	0	6,9034	11,7783
9	Администр. помещение; мебель + бумага (0,75 + 0,25)	14	0,022	0,021	53	1,1612	1,434	0,043	0	273	49	0,030	0,005	0	0,0442	3,1609	2,8387	0,13337	0	3,2782	11,8910
10	Обществ. здание; мебель + линолеум ПВХ (0,9 + 0,1)	14	0,015	0,0137	7	1,369	1,478	0,03	0,0058	178	89	0,020	0,005	0,0058	0,0398	3,7272	2,9258	0,0933	0,0139	4,1091	14,0213
11	Библиотеки, архивы; книги, журналы на стеллажах	14,5	0,0103	0,011	49,5	1,154	1,1087	0,0974	0	148	142	0,088	0,007	0	0,0413	3,1418	2,1947	0,3029	0	4,5564	11,8193
12	Сценическая часть зрительного зала; древесина	13,8	0,0368	0,0145	57	1,15	1,57	0,024	0	186	36	0,015	0,005	0	0,0475	3,1309	3,1079	0,00746	0	2,6570	11,7783
13	Верхняя одежда; ворс, ткани (шерсть + нейлон)	23,3	0,0835	0,013	129	3,698	0,467	0,0145	0	282	13	0,031	0,040	0	0,1076	10,0680	0,9244	0,0451	0	20,3185	37,8749
14	Резинотехнические изделия; резина, изделия из нее	36	0,0184	0,0112	850	2,99	0,416	0,015	0	375	50	0,036	0,299	0	0,8476	9,7360	0,9849	0,0558	0	20,0188	36,6257
15	Окрашенные полы, стены;	14,1	0,0151	0,0145	71,3	1,218	1,47	0,0349	0,001	190	86	0,024	0,007	0,001	0,0594	3,3161	2,9099	0,1085	0,0024	3,4039	12,4747



№	Источник пожара	Справочные данные								Расчетные данные для CFAST					Расчетные данные для FDS CFAST						
33	Хвойные древесные строй-материалы; штабель	13,8	0,0585	0,0063	61	1,15	1,57	0,024	0	81	34	0,015	0,006	0	0,0509	3,1309	3,1079	0,074	0	2,6548	11,7783
34	Лиственные древесные стройматериалы; штабель	13,8	0,0585	0,0014	53	1,15	1,57	0,024	0	180	23	0,015	0,005	0	0,0442	3,1309	3,1079	0,074	0	2,6593	11,7783
35	Клееные стройматериалы; фанера	18,4	0,0167	0,0089	104	1,205	0,54	0,121	0	152	87	0,224	0,028	0	0,0867	3,807	1,0690	0,763	0	7,4087	12,3416
36	Сырье для легкой промышл; хлопок разрыхл,	16,4	0,0445	0,0213	0,6	2,3	0,57	0,0052	0	325	22	0,009	0	0	0,0005	6,2619	1,1283	0,0162	0	13,1763	23,5566
37	Сырье для легкой пром; лен разрыхл,	15,7	0,05	0,0213	3,37	1,83	0,36	0,0039	0	311	20	0,011	0,001	0	0,0028	4,9823	0,7126	0,0121	0	11,9237	18,7428
38	Сырье для легкой промышл; хлопок + капрон (0,75 +,25)	15,7	0,028	0,0125	4,3	3,55	1,045	0,012	0	183	47	0,011	0,001	0	0,0036	9,6651	2,0686	0,0373	0	16,8891	36,3591
39	Сырье для легкой промыш-ленности; шерсть	21,8	0,028	0,02	164	1,759	0,715	0,0153	0	405	32	0,021	0,034	0	0,1367	4,7890	1,4154	0,0476	0	9,7193	18,0157
40	Пищ, промышл.; пшеница, рис, гречиха и мука из них	17	0,005	0,008	1096	0,968	0,812	0,163	0	126	317	0,201	0,197	0	0,9138	2,6354	1,6074	0,5070	0	4,1928	9,9142
41	Сырье и изделия из синтетического каучука	43	0,0143	0,011	212	2,985	1,408	0,15	0,005	440	60	0,107	0,022	0,005	0,2114	9,7197	3,3335	0,5580	0,0143	13,8670	36,5644
42	Склад льноволокна	15,7	0,071	0,0213	3,4	1,83	0,36	0,0039	0	311	14	0,011	0,001	0	0,0028	4,9823	0,7126	0,0121	0	11,9237	18,7428
43	Склад хлопка в тюках	16,7	0,0042	0,0167	0,6	1,15	0,578	0,0052	0	259	264	0,009	0	0	0,0005	3,139	1,1442	0,0162	0	7,5764	11,7783
44	Склад бумаги в рулонах	15,1	0,005	0,008	41	1,158	0,06635	0,1077	0	112	337	0,162	0,009	0	0,042	3,1527	1,3134	0,3350	0	6,6835	11,8602
45	Провода в резиновой изоляции типа КПРТ, ПТ, ВПРС	37,8	0,005	0,1917	850	2,99	0,416	0,015	0	6739	43	0,036	0,299	0	0,8476	9,7360	0,9849	0,0558	0	20,0188	36,6257
46	Склад оргстекла (ПММА)	26,4	0,008	0,0041	78	2,09	1,795	0,1266	0	101	222	0,071	0,006	0	0,0778	6,8054	4,2497	0,4709	0	6,7057	25,6012
47	Кабели + провода; 0,75* (АВВГ, АПВГ, ТПВ) + 0,25* (КПРТ, ПР, ШПРС)	33,5	0,0054	0,0622	612	2,389	0,655	0,0995	0,014	1938	75	0,152	0,137	0,014	0,6102	7,7790	1,5507	0,3701	0,0400	14,7491	29,2638
48	Дерево + лак покрытие; 0,95*древесина + 0,05* (ФЛ + РХО)	13,9	0,0151	0,0225	64,1	1,191	0,724	0,0205	0,0005	291	69	0,028	0,013	0,0005	0,0534	3,2426	1,4332	0,0638	0,0012	6,9570	12,1982
49	Автомобиль; 0,3* (резина, бензин) + 0,15* (ППУ, иск,кожа ПВХ) + 0,1* эмаль	31,7	0,0068	0,0233	487	2,64	1,295	0,097	0,0109	687	100	0,075	0,055	0,0109	0,4856	8,5963	3,0659	0,3608	0,0311	12,6148	32,3384
50	Зал; 0,5* ДВП + 0,1* (ткань, иск,кожа ПВХ, ППУ) + 0,2* дерево с покрытием	16,2	0,0293	0,0123	175,6	1,574	0,817	0,041	0,0143	185	45	0,050	0,031	0,0143	0,1464	4,2853	1,6173	0,1275	0,0342	8,1315	16,1209

№	Источник пожара	Справочные данные								Расчетные данные для CFAST					Расчетные данные для FDS CFAST							
		20,71	0,01	0,018	155	1,52	0,97	0,094	0,0046	362	96	0,097	0,023	0,0046	0,1292	4,1383	1,9202	0,2924	0,0110	6,9235	15,5678	
51	Тара; древесина + картон + полистирол (0,5 + 0,25 + 0,25)	20,71	0,01	0,018	155	1,52	0,97	0,094	0,0046	362	96	0,097	0,023	0,0046	0,1292	4,1383	1,9202	0,2924	0,0110	6,9235	15,5678	
52	Упаковка; бумага + картон + (этилен + стирол) (0,4 + 0,3 + 0,15 + 0,15)	23,54	0,004	0,0132	172	1,7	0,679	0,112	0,0037	289	262	0,165	0,037	0,0037	0,1434	4,6283	1,3441	0,3483	0,0088	9,1181	17,4114	
53	Вешала текстильных изделий	16,72	0,0078	0,0245	61	2,56	0,879	0,063	0	381	117	0,072	0,010	0	0,0509	6,9697	1,7400	0,1959	0	12,6262	26,2195	
54	Отделка; ковровин	15,4	0,021	0,013	150	2,55	1,225	0,207	0,0039	186	62	0,169	0,018	0,0039	0,1251	6,9425	2,4249	0,6438	0,0093	10,1400	26,1171	
55	Мебель + бумага (0,8) + ковровое покрытие (0,2)	14,28	0,034	0,0129	72,4	1,439	0,759	0,068	0,0008	171	40	0,090	0,014	0,0008	0,0604	3,9178	1,5025	0,2115	0,00019	7,7512	14,7382	
56	Занавес зрительного зала кинотеатра	13,8	0,05	0,0115	50	1,03	0,203	0,0022	0	148	29	0,011	0,36	0	0,0417	2,8042	0,4018	0,0068	0	8,7966	10,5492	
57	Магазины	15,8	0,0055	0,015	270	1,25	0,85	0,043	0,023	237	*	-	-	-	0,2251	3,4032	1,6826	0,1337	0,0550	6,3009	12,8025	
58	Столовая, зал ресторана и т.д.	13,8	0,0045	0,015	82	1,437	1,285	0,0022	0,006	200	*	-	-	-	0,0684	3,9123	2,5437	0,0068	0,0143	5,4856	14,7177	
59	Административные помещения, учебные классы школ, ВУЗов, кабинеты поликлиник	14,0	0,0045	0,014	47,7	1,369	1,478	0,03	0,0058	192	*	-	-	-	0,0398	3,7272	2,9258	0,0933	0,0139	4,1091	14,0213	
60	Подсобные и бытовые помещения	14,0	0,042	0,013	53	1,161	0,642	0,0317	0	181	*	-	-	-	0,0442	3,1609	1,2709	0,0986	0	7,1628	11,8910	
61	Лекарственные препараты, содержащие этиловый спирт и глицерин	26,6	-	0,033	88,1	2,304	1,91	0,262	0	878	*	-	--	-	0,0388	3,3121	1,9985	0,4303	0	2,8595	12,4599	
62	Жилые помещения гостиниц, общежитий и т.д.	13,8	0,05	0,012	270	1,03	0,203	0,0022	0,014	200	*				0,2251	2,8042	0,4018	0,0068	0,0335	8,6066	10,5492	
63	Музеи, выставки	13,8	0,0055	0,015	270	1,03	0,203	0,0022	0,014	200	*				0,2251	2,8042	0,4018	0,0068	0,0335	8,6066	10,5492	
64	Зал вокзала	13,8	0,0055	0,015	270	1,03	0,203	0,0022	0,014	200	*				0,2251	2,8042	0,4018	0,0068	0,0335	8,6066	10,5492	

Примечание\* - рассчитывается отдельно

## 6 ПРИЛОЖЕНИЕ 2

Таблица 26 - Выбор варианта задания

Населенный пункт	Вещество	Объем наружного технологического оборудования, м <sup>3</sup>	Диаметр отверстия истечения, мм	Давление в наружном технологическом оборудовании, МПа	Тип пожарной нагрузки в помещении здания	Конфигурация здания	Объем внутреннего технологического оборудования, м <sup>3</sup>	Давление во внутреннем технологическом оборудовании, МПа	Номер варианта
Санкт-Петербург	Пентан	100	16	0,5	Обществ, здания; мебель+линолеум ПВХ (0,9+0,1)	1	0,1	0,01	1.
Санкт-Петербург	Гексан	50	29	0,1	Библиотеки, архивы; книги, журналы на стеллажах	2	0,2	0,05	2.
Санкт-Петербург	Гептан	30	16	0,05	Выст, зал, мастерская; дерево+ткани+краски (0,9+0,09+ 0,01)	3	0,3	0,1	3.
Санкт-Петербург	Октан	10	29	0,01	Промтовары; текстильные изделия	1	0,4	0,01	4.
Москва	Нонан	100	16	0,5	Производство фанеры; древесина+фанера (0,5+0,5)	2	0,1	0,05	5.
Москва	Метанол	50	29	0,1	Пищ, промышл.; пшеница, рис, гречиха и мука из них	3	0,2	0,1	6.
Москва	Этанол-н	30	16	0,05	Зал; 0,5*ДВП+0,1*(ткань, искусж. кожа ПВХ, ППУ)+0,2*дерево с	1	0,3	0,01	7.

Населенный пункт	Вещество	Объем наружного технологического оборудования, м <sup>3</sup>	Диаметр отверстия истечения, мм	Давление в наружном технологическом оборудовании, МПа	Тип пожарной нагрузки в помещении здания	Конфигурация здания	Объем внутреннего технологического оборудования, м <sup>3</sup>	Давление во внутреннем технологическом оборудовании, МПа	Номер варианта
					покрытием				
Москва	Пропанол-н	10	29	0,01	Тара: древесина +картон +полистирол (0,5+0,25+0,25)	2	0,4	0,05	8.
Сыктывкар	Бутанол-н	100	16	0,5	Упаковка: бумага+картон + (этилен +стирол) (0,4+0,3+0,15+0,15)	3	0,1	0,1	9.
Сыктывкар	Пентанол-н	50	29	0,1	Мебель+бумага (0,8)+ ковровое покрытие (0,2)	1	0,2	0,01	10.
Сыктывкар	2-Пропанон	30	16	0,05	Столовая, зал ресторана и т,д,	2	0,3	0,05	11.
Сыктывкар	2-Бутанон	10	29	0,01	Подсобные и бытовые помещения	3	0,4	0,1	12.
Владивосток	2-Пентанон	100	16	0,5	Административные помещения, учебные классы школ, ВУЗов, кабинеты поликлиник	1	0,1	0,01	13.
Владивосток	2-Гексанон	50	29	0,1	Магазины	2	0,2	0,05	14.
Владивосток	Этаналь	30	16	0,05	Резинотехн, изделия; резина, изделия из нее	3	0,3	0,1	15.

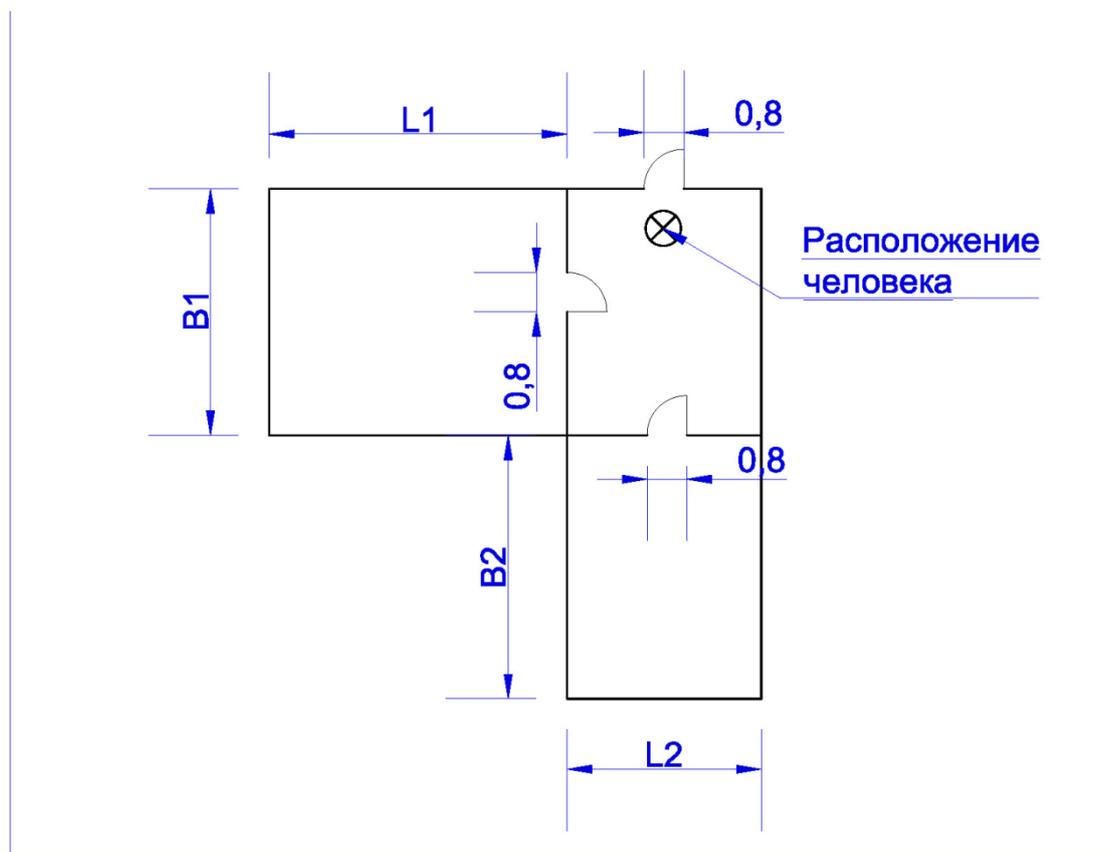
Населенный пункт	Вещество	Объем наружного технологического оборудования, м <sup>3</sup>	Диаметр отверстия истечения, мм	Давление в наружном технологическом оборудовании, МПа	Тип пожарной нагрузки в помещении здания	Конфигурация здания	Объем внутреннего технологического оборудования, м <sup>3</sup>	Давление во внутреннем технологическом оборудовании, МПа	Номер варианта
Владивосток	Пропаналь	10	29	0,01	Радиоматериалы; поли(этилен, стирол, пропилен), гетинакс	1	0,4	0,01	16.
Оренбург	Бутаналь	100	16	0,5	Электротехн. материалы; текстолит, карболит	2	0,1	0,05	17.
Оренбург	Пентаналь	50	29	0,1	Телефонный кабель ТВП; ПВХ+полиэтилен	3	0,2	0,1	18.
Оренбург	Гексаналь	30	16	0,05	Провода в резиновой изоляции типа КПРТ, ПТ, ВПРС	1	0,3	0,01	19.
Оренбург	Бензол	10	29	0,01	Кабели+провода; 0,75* (АВВГ, АПВГ, ТПВ)+0,25*(КПРТ, ПР, ШРПС)	2	0,4	0,05	20.
Сочи	Метилбензол	100	16	0,5	Лекарственные препараты, содержащие этиловый спирт и глицерин	3	0,1	0,1	21.
Сочи	1, 2- Диметилбензол	50	29	0,1	Здания I-II ст, огнест.; мебель+бытовые изделия	1	0,2	0,01	22.
Сочи	2,3-	30	16	0,05	Здания I-II ст, огнест.; ме-	2	0,3	0,05	23.

Населенный пункт	Вещество	Объем наружного технологического оборудования, м <sup>3</sup>	Диаметр отверстия истечения, мм	Давление в наружном технологическом оборудовании, МПа	Тип пожарной нагрузки в помещении здания	Конфигурация здания	Объем внутреннего технологического оборудования, м <sup>3</sup>	Давление во внутреннем технологическом оборудовании, МПа	Номер варианта
	Диметил-2-бутен				бель+ткани				
Сочи	2,2 - Диметилбутан	10	29	0,01	Здания III-IV ст, огнест,; мебель+бытовые изделия	3	0,4	0,1	24.
Тюмень	1-Пентин	100	16	0,5	Здание III-IV ст, огнест,; мебель+ткани	1	0,1	0,01	25.
Тюмень	1-Гексин	50	29	0,1	Здание I ст, огнест,; мебель+ткани (0,75+0,25)	2	0,2	0,05	26.
Тюмень	1-Гептин	30	16	0,05	Здание III ст, огнест,; мебель+ткани (0,75+0,25)	3	0,3	0,1	27.
Тюмень	1-Пентен	10	29	0,01	Помещение, облицованное панелями; панели ДВП	1	0,4	0,01	28.
Красноярск	1-Гексен	100	16	0,5	Верхняя одежда; ворс, ткани (шерсть+нейлон)	2	0,1	0,05	29.
Красноярск	1-Гептен	50	29	0,1	Окрашенные полы, стены; дерево+краска РХО (0,9+0,1)	3	0,2	0,1	30.

Населенный пункт	Вещество	Объем наружного технологического оборудования, м <sup>3</sup>	Диаметр отверстия истечения, мм	Давление в наружном технологическом оборудовании, МПа	Тип пожарной нагрузки в помещении здания	Конфигурация здания	Объем внутреннего технологического оборудования, м <sup>3</sup>	Давление во внутреннем технологическом оборудовании, МПа	Номер варианта
Красноярск	2-Октен	30	16	0,05	Цех деревообработки; древесина	1	0,3	0,01	31.
Красноярск	2-Нонен	10	29	0,01	Автомобиль; 0,3*(резина, бензин)+0,15*(ППУ, искожа ПВХ) +0,1*эмаль	2	0,4	0,05	32.
Хабаровск	Циклогексан C <sub>6</sub> H <sub>12</sub>	100	16	0,5	Дерево+лак, покрытие; 0,95*древесина+0,05*(ФЛ+РХО)	3	0,1	0,1	33.
Хабаровск	Циклогексанон C <sub>6</sub> H <sub>10</sub> O	50	29	0,1	Жилые помещения гостиниц, общежитий и т,д,	1	0,2	0,01	34.
Хабаровск	Циклогексен C <sub>6</sub> H <sub>10</sub>	30	16	0,05	Музеи, выставки	2	0,3	0,05	35.
Хабаровск	Циклопентан C <sub>5</sub> H <sub>10</sub>	10	29	0,01	Зал вокзала	3	0,4	0,1	36.

## 7 ПРИЛОЖЕНИЕ 3

### Конфигурация помещений

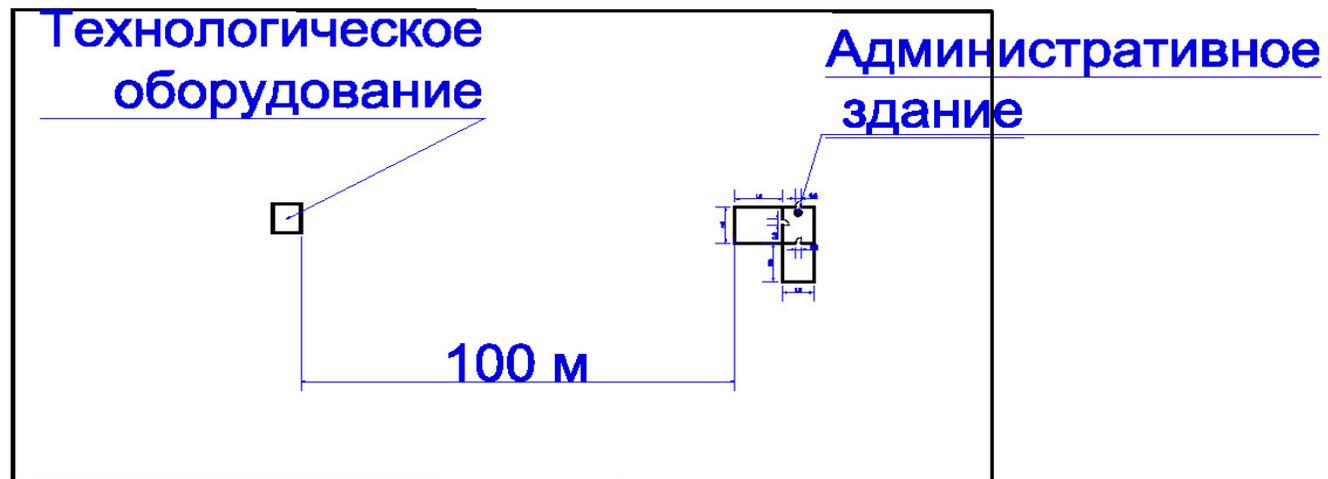


Тип помещения	Высота	B1	B2	L1	L2
№1	3,4	65	71	42	29
№2	4,3	56	35	31	62
№3	2,6	50	40	29	38

Дверные проемы расположены в центре, соответствующих стен,

## 8 ПРИЛОЖЕНИЕ 4

Технологическая площадка



## 9 СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1, ГОСТ 12,1,044-89\*, «Пожаровзрывоопасность веществ и материалов Номенклатура показателей и методы их определения»,
- 2, Монахов В,Т., Методы исследования пожарной опасности веществ, М., Химия, 1972, 416 с,
- 3, ГОСТ 12,1,010-76 Система стандартов безопасности труда, Взрывобезопасность, Общие требования,
- 4, ГОСТ 12,1,011-78 Смеси взрывоопасные, Классификация,
- 5, Технический регламент о требованиях пожарной безопасности: Федеральный закон от 22 июля 2008 № 123-ФЗ [Электронный ресурс] URL:[http://docs,cntd,ru](http://docs.cntd.ru) (дата обращения: 01,09,2019),
- 6, ГОСТ Р 12,3,047-2012 Пожарная безопасность технологических процессов, Общие требования, Методы контроля,
- 7, Баратов А,Н, и др, Пожаровзрывоопасность веществ и материалов и средства их тушения, М, Химия, — 1990,
- 8, СП 131,13330,2018, «Строительная климатология»,
- 9, Приказ МЧС России № 404 от 10,07,2009 г, «Об утверждении методики определения расчетных величин пожарного риска на производственных объектах»,
- 10, СП 12,13130,2009 Определение категорий помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности (с Изменением № 1) [Электронный ресурс] URL: [http://docs,cntd,ru](http://docs.cntd.ru) (дата обращения: 01,09,2019),
- 11, **Кошмаров Ю,А**, Прогнозирование опасных факторов пожара в помещении: Учебное пособие,-М,: Академия ГПС МВД России, 2000, 118 с,

**Кожевин Дмитрий Федорович**  
*кандидат технических наук, доцент*  
**Коробейникова Елена Германовна**  
*кандидат химических наук, доцент*

**Физико-химические основы развития  
и тушения пожаров**

МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ  
ПО ВЫПОЛНЕНИЮ  
КУРСОВОГО ПРОЕКТА

Ответственный за выпуск

Кожевин Д,Ф,

Подписано к печати

Тираж 100 экз,

Формат 60 x 84 1/16

Печать офсетная

Уч, – изд, л, 1,5

Заказ №

Отпечатано в Санкт-Петербургском институте ГПС МЧС России,  
196105, Санкт-Петербург, Московский пр., д, 149