

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

Академия государственной противопожарной службы МЧС России

На правах рукописи



Грохотов Михаил Андреевич

**МЕТОДИКА ПРОГНОЗИРОВАНИЯ СКОРОСТИ
РАСПРОСТРАНЕНИЯ ФРОНТА ПЛАМЕНИ ПРИ СГОРАНИИ
ГАЗОВОЗДУШНОГО ОБЛАКА В ОТКРЫТОМ ПРОСТРАНСТВЕ**

Специальность: 05.26.03 – Пожарная и промышленная безопасность
(нефтегазовая отрасль, технические науки)

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, профессор
Бегишев Ильдар Рафатович

Москва – 2018

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	6
ГЛАВА 1. АНАЛИЗ МЕТОДИК ОЦЕНКИ ЗОН ВОЗДЕЙСТВИЯ ПОРАЖАЮЩИХ ФАКТОРОВ ПРИ ВНЕШНИХ ВЗРЫВАХ ГАЗОВОЗДУШНЫХ СМЕСЕЙ НА ПОЖАРОВЗРЫВООПАСНЫХ ОБЪЕКТАХ.....	11
1.1. Краткий анализ аварийных ситуаций с взрывом газозвоздушных смесей.....	11
1.2. Анализ методик, используемых в нормативных документах для расчёта взрывных нагрузок при аварийных взрывах.....	14
1.2.1. Методика, используемая в «Общих правилах взрывобезопасности для взрывопожароопасных химических, нефтехимических и нефтеперерабатывающих производств» (приказ Ростехнадзора № 96 от 11.03.2012 г.).....	14
1.2.2. Методика, используемая в «Методике определения расчётных величин пожарного риска на производственных объектах» (приказ МЧС России №404 от 10.06.2009 г.).....	18
1.2.3. Методика, разработанная М.А. Садовским	19
1.2.4. Методика, используемая в «Определение категорий помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности» СП 12.13130.2009	20
1.2.5. Методика, используемая в «Системе стандартов безопасности труда. Пожарная безопасность технологических процессов. Общие требования. Методы контроля» ГОСТ Р 12.3.047–2012	21
1.3. Анализ существующих методик расчета нагрузок на здания и сооружения при дефлаграционном горении смесей в открытом пространстве	21
1.3.1. Общая характеристика дефлаграционных взрывов	21
1.3.2. Методики расчёта параметров воздушных волн сжатия при дефлаграционных взрывах, основанные на расчёте параметров	

волн сжатия от сферы, расширяющейся во времени	22
1.3.3. Методика определения скорости распространения фронта пламени при дефлаграционных взрывах в открытом пространстве	26
1.4. Сравнение результатов расчётов параметров взрыва по анализируемым методикам	28
Выводы.....	31
ГЛАВА 2. МОДЕЛЬ ФОТОТЕПЛОВОГО ВОСПЛАМЕНЕНИЯ ДЛЯ РАСЧЁТА ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПОЖАРОВЗРЫВООПАСНОСТИ ГАЗОВЫХ СМЕСЕЙ	
2.1. Математическая модель фототеплового воспламенения	33
2.2. Методика эксперимента.....	44
2.3. Экспериментальные значения предельных параметров воспламенения смесей метана с хлором	48
2.4. Апробация математической модели фототеплового воспламенения	52
Выводы.....	62
ГЛАВА 3. ИССЛЕДОВАНИЯ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ СКОРОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ФРОНТА ПЛАМЕНИ В ГАЗОВОЗДУШНЫХ СМЕСЯХ.....	
3.1. Определение параметров распространения пламени в пропановоздушной смеси	63
3.2. Результаты экспериментальных исследований	65
3.3. Теоретический расчёт скорости распространения фронта фронта пламени в газовых смесях	76
3.3. Сравнение усовершенствованной методики определения скорости распространения фронта пламени с существующими.....	80
Выводы.....	84
ГЛАВА 4. ВЕРИФИКАЦИЯ УСОВЕРШЕНСТВОВАННОЙ МЕТОДИКИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ СКОРОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ФРОНТА ПЛАМЕНИ ПРИ СГОРАНИИ ГАЗОВОЗДУШНОЙ СМЕСИ НА ОСНОВЕ СРАВНИТЕЛЬНОГО АНАЛИЗА РЕЗУЛЬТАТОВ РАСЧЁТА	

С ПОСЛЕДСТВИЯМИ РЕАЛЬНЫХ АВАРИЙНЫХ ВЗРЫВОВ	85
4.1. Взрыв на заводе «Нипро Кемикл Планта» в г. Фликсборо (Англия)	85
4.1.1. Расчёт параметров взрыва по «Методике оценки последствий аварийных взрывов топливно-воздушных смесей» (Вариант I)	88
4.1.2. Расчёт параметров взрыва по «Методике расчёта нагрузок на здания и сооружения при воздействии внешних дефлаграционных взрывов».....	90
4.1.2.1. Расчёт скорости распространения фронта пламени, по методике предложенной Д.З. Хуснутдиновым (Вариант II)	90
4.1.2.2. Расчёт скорости распространения фронта пламени по методике, описанной в главе 3 (Вариант III).....	91
4.1.3. Оценка возможных последствий взрыва.	93
4.1.4 Анализ результатов расчёта и последствий взрыва.....	96
4.2. Взрыв на участке магистрального газопровода «Нижневартовск–Курган–Куйбышев»	97
4.2.1. Расчёт параметров взрыва по «Методике оценки последствий аварийных взрывов топливно-воздушных смесей» (Вариант I)	98
4.2.2. Расчёт параметров взрыва по «Методике расчёта нагрузок на здания и сооружения при воздействии внешних дефлаграционных взрывов»	99
4.2.2.1. Расчёт скорости распространения фронта пламени, по методике Д.З. Хуснутдинова (Вариант II).....	99
4.2.2.2. Расчёт скорости распространения фронта пламени по методике, описанной в главе 3 (Вариант III).....	100
4.2.3 Анализ результатов расчёта и последствий взрыва.....	101
Выводы.....	102
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	104
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	105
Приложение А. АКТЫ ВНЕДРЕНИЯ	116
Приложение Б. КОД ПРОГРАММЫ «РАСЧЁТНЫЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПОЖАРОВЗРЫВООПАСНОСТИ	

ГАЗОВЫХ СМЕСЕЙ	121
Приложение В. СВИДЕТЕЛЬСТВА О РЕГИСТРАЦИИ ПРОГРАММЫ ДЛЯ ЭВМ.....	138

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. На территории объектов нефтегазовой отрасли в результате разгерметизации (разрушения) технологического оборудования или трубопроводов возможно образование больших объёмов горючих газоздушных смесей (ГВС), воспламенение которых может привести к пожарам, взрывам и разрушениям зданий (сооружений). Согласно статистики Ростехнадзора на рассматриваемых объектах ежегодно происходит до 10 инцидентов, связанных со взрывами ГВС как в замкнутых объёмах, так и в открытом пространстве. Одним из характерных примеров взрыва ГВС в открытом пространстве является инцидент, произошедший в 2014 г. на ОАО «Ачинский НПЗ Восточная нефтяная компания». В результате взрыва ГВС на территории объекта площадью около 300 тыс. м² были полностью разрушены до 30 % производственных зданий и сооружений, а остальные – сильно повреждены. При этом 32 человека получили травмы различной степени тяжести, из них 8 – смертельные.

В соответствии с требованиями ст. 6 Федерального закона № 123-ФЗ «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности» одним из условий соответствия объекта защиты требованиям пожарной безопасности является выполнение в полном объеме требований пожарной безопасности, установленных техническими регламентами, и пожарный риск не должен превышать допустимых значений. Оценка пожарного риска проводится в настоящее время по «Методике определения расчётных величин пожарного риска на производственных объектах» (утверждена приказом МЧС России № 404 от 10.07.2009 г.), содержащей в том числе, метод количественной оценки параметров волны давления при сгорании газоздушного облака. На численные значения параметров взрывной волны основное влияние оказывает скорость распространения фронта пламени (СРФП). Трудность в определении СРФП заключается в том, что она меняется в процессе распространения, зависит от газодинамических процессов и определяется особенностями кинетики химической реакции. При этом расчеты СРФП, выполненные

как по указанному выше методу, так и по «Методике оценки последствий аварийных взрывов топливно-воздушных смесей» (утверждена приказом Ростехнадзора № 137 от 31.06.2016 г.), «Методике определения параметров волны сжатия внешних дефлаграционных взрывов» (разработана НТЦ «Взрывоустойчивость», 1998 г.), а также по методике, предложенной профессором В.И. Макеевым, показали, что полученные значения СРФП существенно различаются между собой.

Таким образом, развитие методики определения СРФП при сгорании ГВС в открытом пространстве позволит точнее прогнозировать последствия аварийных взрывов и, как следствие, предусматривать необходимые мероприятия противопожарной защиты, которые, в свою очередь, должны быть учтены при определении расчётных величин пожарного риска.

Степень разработанности темы исследования. Вопросами процесса сгорания ГВС и определением СРФП занимались как отечественные (Д.А. Франк-Каменецкий, Н.Н. Семёнов, Я.Б. Зельдович, А.С. Компанец, К.И. Щёлкин, В.И. Макеев, Ю.Н. Шебеко, А.В. Мишуев, Д.З. Хуснутдинов, А.А. Комаров, В.А. Горев и др.), так и зарубежные учёные (*G. Damkohler, D.T. Williams, L.M. Bollinger, B. Lewis, V.C. Marshall, G. Von Elbe, R.G. Abdel-Gayed, D. Bradley, D. Lee, K.Y. Huh et. all*).

Однако, несмотря на значительные достижения в этой области исследований, до настоящего времени отсутствует единое мнение в выборе методики для определения СРФП при сгорании ГВС в открытом пространстве.

Цель работы: совершенствование методики прогнозирования СРФП при сгорании газозаполненного облака в открытом пространстве.

В соответствии с целью были сформулированы следующие **задачи:**

1. Выполнить анализ существующих методик определения параметров взрыва ГВС в открытом пространстве и выявить их отличительные особенности;
2. Разработать математическую модель фототеплового воспламенения, необходимую для расчёта показателей пожаровзрывоопасности газовых смесей, основанную на законах химической кинетики и термодинамики;

3. Теоретически обосновать расчёт СРФП при сгорании ГВС, учитывающую физико-химические и газодинамические свойства горючей среды;

4. Провести верификацию усовершенствованной методики прогнозирования СРФП на основе сравнительного анализа результатов расчёта с последствиями реальных аварийных взрывов.

Объект исследования – процесс сгорания ГВС, образовавшейся при аварийных выбросах горючих газов из технологического оборудования или трубопроводов в открытом пространстве.

Предмет исследования – определение СРФП при сгорании ГВС.

Научная новизна работы заключается в следующем:

– разработана математическая модель фототеплового воспламенения, позволяющая рассчитывать показатели пожаровзрывоопасности горючих газовых смесей, которая учитывает химическую кинетику и термодинамику процесса;

– получена теоретически обоснованная формула для расчёта СРФП при сгорании ГВС;

– экспериментально установлена динамика изменения СРФП для пропановоздушной смеси стехиометрического состава в зависимости от расположения источника зажигания и условий расширения сгорающей ГВС.

Теоретическая и практическая значимость работы. Разработанная математическая модель фототеплового воспламенения, базирующаяся на кинетике химического взаимодействия и тепловой теории распространения пламени, является универсальной и может быть использована для определения показателей пожаровзрывоопасности любых газовых смесей с известными кинетическими параметрами и теплофизическими свойствами.

Формула для расчёта СРФП, полученная теоретически с учётом физико-химических и газодинамических свойств газовой среды, может применяться для прогнозирования последствий аварийных выбросов горючих газов в открытом пространстве, в том числе, при оценке пожарных рисков.

Методология и методы исследования. Основу теоретических исследований составляли методы математического моделирования и физического подобия,

физический эксперимент, теория ошибок, сравнение, описание. Результаты численных расчётов подтверждены результатами экспериментальных исследований, в том числе, выполненных другими авторами.

Информационной основой исследования являлись отечественные и зарубежные литературные источники, нормативные документы, а также материалы расследований аварийных взрывов на объектах нефтегазовой отрасли.

Положения, выносимые на защиту:

- математическая модель фототеплового воспламенения, позволяющая определять показатели пожаровзрывоопасности газовых смесей;
- теоретически обоснованная формула для прогнозирования СРФП при сгорании ГВС в открытом пространстве;
- результаты верификации методики прогнозирования СРФП на основе сравнительного анализа результатов расчётов с последствиями реальных аварийных взрывов.

Степень достоверности полученных результатов и выводов, сформулированных в диссертации, подтверждается: обоснованностью выбора параметров и критериев, позволяющих сравнивать теоретические и экспериментальные данные; экспериментальные исследования выполнялись с применением измерительного оборудования, прошедшего поверку и откалиброванного для соответствующих условий; внутренней непротиворечивостью результатов и их согласованностью с результатами экспериментов и данными других авторов.

Материалы диссертации реализованы:

- при разработке свода правил СП 231.1311500.2015 Обустройство нефтяных и газовых месторождений. Требования пожарной безопасности. Балашиха: ФГБУ ВНИИПО МЧС России, 2018 г.;
- при определении пожаровзрывобезопасного режима работы реактора хлорирования метана на предприятии ООО «ГалоПолимер Кирово-Чепецк». Кирово-Чепецк: ООО «ГалоПолимер Кирово-Чепецк», 2018 г.;
- при расчёте безопасных расстояний от оборудования оптоволоконной системы мониторинга трубопроводов (ОСМТ) «Омега» до трубопроводов и техно-

логического оборудования, где при авариях возможно образование горючих ГВС. М.: АО «ОМЕГА», 2018 г;

- при разработке лекций и проведении практических и семинарских занятий по дисциплине «Теория горения и взрыва». М.: Академия ГПС МЧС России, 2018 г.

Основные результаты работы доложены на: 5-й Международной научно-практической конференции «Пожаротушение: проблемы, технологии, инновации» (г. Москва, Академия ГПС МЧС России, 2016); XIX Международной межвузовской научно-практической конференции студентов, магистрантов, аспирантов и молодых учёных «Строительство – формирование среды жизнедеятельности» (г. Москва, НИУ МГСУ, 2016); 25-й Международной научно-технической конференции «Системы безопасности – 2016» (г. Москва, Академия ГПС МЧС России, 2016); VI Международной научно-практической конференции молодых учёных и специалистов «Проблемы техносферной безопасности – 2017» (г. Москва, Академия ГПС МЧС России, 2017); XXIX Международной научно-практической конференции: «Горение и проблемы тушения пожаров». (г. Балашиха, ФГБУ ВНИИПО МЧС России, 2017); 26-й Международной научно-технической конференции «Системы безопасности – 2017» (г. Москва, Академия ГПС МЧС России, 2017); 6-й Международной научно-практической конференции «Пожаротушение: проблемы, технологии, инновации» (г. Москва, Академия ГПС МЧС России, 2018).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 13 научных работ.

Структура, объём работы. Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка литературы и трёх приложений. Содержание работы изложено на 140 страницах текста, включает в себя 21 таблицу, 47 рисунков, список литературы из 96 наименований.

ГЛАВА 1 АНАЛИЗ МЕТОДИК ОЦЕНКИ ЗОН ВОЗДЕЙСТВИЯ ПОРАЖАЮЩИХ ФАКТОРОВ ПРИ ВНЕШНИХ ВЗРЫВАХ ГАЗОВОЗДУШНЫХ СМЕСЕЙ НА ПОЖАРОВЗРЫВООПАСНЫХ ОБЪЕКТАХ

1.1. Краткий анализ аварийных ситуаций с взрывом газозвушных смесей

16 июня 2014 года в ОАО «Ачинский НПЗ Восточная нефтяная компания» в секции С-400 на газофракционирующей установке ЛК-бу, предназначенной для получения сжиженных углеводородных газов, в верхней части колонны произошла разгерметизация горизонтального участка трубопровода [1]. В течение 5 минут происходил массивный выброс смеси углеводородов. В результате облако газа распространилось по территории и, достигнув высокотемпературного источника зажигания (печи), газовая смесь воспламенилась с дальнейшим её взрывом и пожаром (рисунок 1.1).



Рисунок 1.1 – Воспламенение газозвушной смеси от печи секции С-200

Вследствие аварии в зоне действия ударной волны на территории радиусом 300 метров от места взрыва было полностью разрушено оборудование секции С-400. Частично разрушено остекление зданий насосной установки утилиза-

ции сероводородного газа и других зданий. 32 человека получили травмы различной тяжести, 8 из них смертельные (рисунок 1.2).



Рисунок 1.2 – Последствия аварии на Ачинском нефтеперерабатывающем заводе

7 февраля 2014 года на газонаполнительной станции в п. Чагода Вологодской обл. произошёл взрыв. Ситуационный план объекта представлен на рисунке 1.3.



Рисунок 1.3 – Ситуационный план размещения зданий на предприятии ООО «НоваКом ПСВ»

Причиной взрыва стала утечка газа пропан-бутан из автомобильной цистерны, находившейся в боксе. Источником зажигания газовой смеси согласно расследованию [2] послужил выключатель света.

В результате взрыва разрушены здание гаража и здание административного корпуса ООО «НоваКом ПСВ» (рисунок 1.4).



Рисунок 1.4 – Последствия аварии на газонаполнительном пункте
ООО «НоваКом ПСВ» в п. Чагода

В зданиях, расположенных в радиусе 100 метров, были разрушены остекления. Два человека получили тяжёлые травмы, один скончался на месте.

Необходимо отметить, что выброс или утечка газа не всегда сопровождаются взрывом. Это обусловлено физико-химическими и взрывоопасными свойствами горючих газов. Узкие интервалы взрывоопасных концентраций газовой смеси, меньшая плотность газа по сравнению с плотностью воздуха обуславливает быстрый подъём выбросов в верхние слои атмосферы и его рассеивание [3].

1.2 Анализ методик, используемых в нормативных документах для расчёта взрывных нагрузок при аварийных взрывах

1.2.1 Методика, используемая в «Общих правилах взрывобезопасности для взрывопожароопасных химических, нефтехимических и нефтеперерабатывающих производств» (приказ Ростехнадзора № 96 от 11.03.2012 г.)

В данном приказе [4] для расчёта размеров зон поражения используются две методики. Для расчёта зон поражения при взрывах жидких и твердых веществ или для приближённого расчёта последствий взрыва топливно-воздушных смесей (ТВС) в замкнутых объёмах применяется методика, основанная на тротиловом эквиваленте. При взрывах ТВС на наружных установках используется методика, учитывающая тип взрывного превращения (детонация / дефлаграция) при воспламенении ГВС.

Тротильный эквивалент определяется по условиям адекватности характера и степени разрушения при взрывах парогазовых облаков, твердых и жидких химически нестабильных соединений и рассчитывается по следующим формулам:

– для жидких и твердых химически нестабильных веществ:

$$W_T = \frac{q_k}{q_T} M_k, \quad (1.1)$$

где M_k – масса твердых и жидких химически нестабильных соединений, определяемая по их содержанию в технологической системе, блоке, аппарате, кг;

q_k – удельная энергия взрыва твердых и жидких химически нестабильных соединений, кДж/кг;

q_T – удельная энергия взрыва тринитротолуола (далее – ТНТ), кДж/кг.

– для парогазовых смесей:

$$W_T = \frac{0,4 q_G}{0,9 q_T} M_G, \quad (1.2)$$

где 0,4 – доля энергии взрыва парогазовой среды, затрачиваемая непосредственно на формирование ударной волны;

0,9 – доля энергии взрыва ГНТ, затрачиваемая непосредственно на формирование ударной волны;

q_T – удельная теплота сгорания парогазовой среды;

M_T – приведенная масса горючих (парогазовых) веществ, участвующих во взрыве.

Из расчёта тротилового эквивалента определяется радиус зоны поражения по формуле:

$$R = K \frac{\sqrt[3]{W_T}}{[1 + (\frac{3180}{W_T})^2]^{1/6}}, \quad (1.3)$$

где K – безразмерный коэффициент, характеризующий воздействие взрыва на объект, определяется по таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Классификация зон разрушения типовых зданий и оборудования

Класс зоны разрушения	К	ΔP , кПа	Возможные последствия, характер повреждений зданий и сооружений
1	3,8	≥ 100	Полное разрушение зданий с массивными стенами
2	5,6	70	Разрушение стен кирпичных зданий толщиной в 1,5 кирпича; перемещение цилиндрических резервуаров; разрушение трубопроводных эстакад
3	9,6	28	Разрушение перекрытий промышленных зданий; разрушение промышленных стальных несущих конструкций; деформации трубопроводных эстакад
4	28	14	Разрушение перегородок и кровли зданий; повреждение стальных конструкций каркасов, ферм
5	56	≤ 2	Граница зоны повреждений зданий; частичное повреждение остекления

При массе паров более 5000 кг радиус зоны может определяться по формуле:

$$R = K \sqrt[3]{W_T}. \quad (1.4)$$

В методике, учитывающей тип взрывного превращения (детонация / дефлаграция) при воспламенении ГВС, рассчитываются основные параметры воздушно-ударной волны в зависимости от расстояния до центра облака.

Для вычисления параметров воздушно-ударной волны на расстоянии R от центра взрыва при детонации облака ГВС рассчитывается безразмерное расстояние по формуле:

$$R_x = R / \left(\frac{E}{P_0} \right)^{\frac{1}{3}}, \quad (1.5)$$

где E – эффективный энергозапас ГВС ($E = M_r \cdot q_r$), Дж; P_0 – атмосферное давление, Па.

Далее рассчитывается безразмерное давление P_x и безразмерный импульс фазы сжатия I_x .

Для детонации облака газовой ГВС расчёт производится по формулам:

$$\ln(P_x) = -1,124 - 1,66 \ln(R_x) + 0,26(\ln(R_x))^2 \pm 10\%, \quad (1.6)$$

$$\ln(I_x) = -3,4217 - 0,898 \ln(R_x) - 0,009(\ln(R_x))^2 \pm 15\%. \quad (1.7)$$

Зависимости (1.6) и (1.7) справедливы для значений $0,2 < R_x < 6,5$. В случае $R_x < 0,2$ величина P_x полагается равной 18, а в выражение (1.7) подставляется значение $R_x = 0,142$.

Для детонации облака гетерогенной ГВС расчёт производится по следующим формулам:

$$P_x = 0,125 / R_x + 0,137 / (R_x)^2 + 0,023 / (R_x)^3 \pm 10\% , \quad (1.8)$$

$$I_x = 0,022 / R_x \pm 15\%. \quad (1.9)$$

Зависимости (1.8) и (1.9) справедливы для значений $R_x > 0,25$. В случае если $R_x < 0,25$, величина P_x полагается равной 18, а величина $I_x = 0,16$.

При дефлаграционном взрывном превращении облака ГВС к параметрам, влияющим на величины избыточного давления и импульса положительной фазы, добавляются скорость распространения фронта пламени ϑ и степень расширения продуктов сгорания ε . Видимая скорость фронта пламени определяется по таблице №2 приложения №3 [5] в зависимости режима взрывного превращения:

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

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

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

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

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

$$\mathfrak{D} = k_1 \cdot (M_T)^{1/6}, \quad (1.10)$$

где k_1 – константа, равная 43;

M_T – масса горючего вещества, содержащегося в облаке, кг;

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

$$\mathfrak{D} = k_2 \cdot (M_T)^{1/6}, \quad (1.11)$$

где k_2 – константа, равная 26.

Безразмерное давление P_{x1} и безразмерный импульс фазы сжатия I_{x1} рассчитываются по формулам:

$$P_{x1} = (\mathfrak{D} / c_0)^2 ((\varepsilon - 1) / \varepsilon)(0,83/R_x - 0,14(R_x)^2), \quad (1.12)$$

$$I_{x1} = (\mathfrak{D} / c_0)((\varepsilon - 1) / \varepsilon)(1 - 0,4(\varepsilon - 1) \mathfrak{D} / \varepsilon c_0)(0,06 / R_x + 0,01/(R_x)^2 - 0,0025/(R_x)^3), \quad (1.13)$$

где c_0 – скорость звука в воздухе, м/с;

ε – степень расширения продуктов сгорания.

Выражения (1.12) и (1.13) справедливы для $R_x > 0,34$, в противном случае R_x принимается равным 0,34.

Затем по формулам (1.6)–(1.9) рассчитываются P_{x2} и I_{x2} , которые соответствуют детонационному режиму. После сравнения значений, полученных при детонационном и дефлаграционном горении, берут минимальное значение.

$$P_x = \min(P_{x1}, P_{x2}), I_x = \min(I_{x1}, I_{x2}). \quad (1.14)$$

Далее после определения безразмерных величин вычисляются соответствующие им размерные величины:

$$\Delta P = P_x \cdot P_0; \quad (1.15)$$

$$I = I_x(P_0)^{2/3} E^{1/3} / c_0. \quad (1.16)$$

Таким образом, определены искомые величины максимального избыточного давления в волне сжатия и импульса фазы сжатия на заданном расстоянии от места воспламенения смеси.

**1.2.2 Методика, используемая в «Методике определения расчётных величин
пожарного риска на производственных объектах»
(приказ МЧС России №404 от 10.06.2009 г.)**

В данной методике [6] при определении параметров волны давления при сгорании ГВС рассчитывается в зависимости от ожидаемого режима сгорания облака. Режим сгорания облака зависит от класса горючего вещества и вида окружающего пространства. Режимы сгорания разделяются на шесть классов по диапазонам скоростей их распространения также как и в методике [5].

1-й класс режима сгорания облака

Рассчитывается безразмерное расстояние по формуле (1.5), затем безразмерное давление P_x и импульс фазы сжатия I_x по формулам:

$$\ln(P_x) = -1,124 - 1,66 \ln(R_x) + 0,26(\ln(R_x))^2, \quad (1.17)$$

$$\ln(I_x) = -3,4217 - 0,898 \ln(R_x) - 0,009(\ln(R_x))^2. \quad (1.18)$$

Формулы (1.17) и (1.18) справедливы для значений $R_x > 0,2$. В случае $R_x < 0,2$ величина P_x полагается равной 18, а в выражение (1.18) подставляется величина $R_x = 0,14$.

Размерные величины избыточного давления и импульса фазы сжатия определяются по формулам (1.15) и (1.16).

2–6-й классы режима сгорания облака

Рассчитывается безразмерное расстояние R_x от центра облака по формуле (1.5). Значения безразмерного давления P_{x1} и импульса фазы сжатия I_{x1} вычисляются по формулам:

$$P_{x1} = \left(\frac{g^2}{c_0^2}\right) \left(\frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon}\right) \left(\frac{0,83}{R_x} - \frac{0,14}{R_x^2}\right), \quad (1.19)$$

$$I_{x1} = W(1 - 0,4W) \left(\frac{0,06}{R_x} + \frac{0,01}{R_x^2} + \frac{0,0025}{R_x^3} \right), \quad (1.20)$$

$$W = \frac{\vartheta}{c_0} \left(\frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon} \right). \quad (1.21)$$

Формулы (1.19) и (1.20) справедливы для значений $R_x > 0,34$, если $R_x < 0,34$, то $R_x = 0,34$.

Безразмерные величины избыточного давления и импульса фазы сжатия P_{x1} и I_{x1} подставляются в формулы (1.15) и (1.16) вместо P_x и I_x .

Отличие методики [6] от методики [5] является то, что в методике [5] параметры взрыва для газовой и гетерогенной ГВС рассчитываются по-разному, во время как в [6] определяются одинаково.

1.2.3 Методика, разработанная М.А. Садовским

Данная методика [7] может использоваться после перевода конденсированного взрывчатого вещества в тротиловый эквивалент по формуле (1.1).

Методика основана на результатах целенаправленных научных экспериментальных исследований. Прошла многократную проверку как при крупных тротильных взрывах, так и при ядерных испытаниях на Семипалатинском ядерном полигоне, и ныне стала классической.

Первоначально формула для определения давлений на фронте ВУВ при воздушном взрыве имела следующий вид:

$$P_{\text{изб}} = \frac{0,84}{R_x} + \frac{2,7}{R_x^2} + \frac{7,0}{R_x^3}, \quad (1.22)$$

где $P_{\text{изб}}$ – избыточное давление на фронте волны, $\text{кгс}/\text{см}^2$;

R_x – приведённое расстояние,

$$R_x = \frac{R}{\sqrt[3]{M}}, \text{ м}/\text{кг}^{\frac{1}{3}} \quad (1.23)$$

где M – масса заряда, кг .

Для использования в системе СИ и удобства вычислений формула преобразована к виду:

$$P_{\text{изб}} = \frac{1}{R_x} \left(82,4 + \left(265 + \frac{1}{R_x} \cdot 687 \right) \right), \text{ кПа.} \quad (1.24)$$

Для определения радиуса с заданным давлением расчёт проводится по формуле:

$$R = R_x \cdot \sqrt[3]{K_B \cdot M}, \quad (1.25)$$

где K_B – коэффициент, равный 1 – для воздушного взрыва и 2 – для наземного взрыва.

1.2.4 Методика, используемая в «Определение категорий помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности» СП 12.13130.2009

В методике [8] для определения избыточного давления, развиваемого при сгорании ГВС, используется формула:

$$P_{\text{изб}} = P_0 \left(\frac{0,8m_{\text{пр}}^{0,33}}{r} + \frac{3m_{\text{пр}}^{0,66}}{r^2} + \frac{5m_{\text{пр}}}{r^3} \right), \text{ кПа,} \quad (1.26)$$

где P_0 – атмосферное давление, кПа (допускается принимать равным 101 кПа);

r – расстояние от геометрического центра газоздушного облака, м;

$m_{\text{пр}}$ – приведенная масса газа или пара, кг.

Приведённая масса газа или пара рассчитывается по формуле:

$$m_{\text{пр}} = \frac{q_{\text{г}}}{Q_0} M_{\text{г}} Z, \quad (1.27)$$

где $q_{\text{г}}$ – удельная теплота сгорания газа или пара, Дж/кг;

Q_0 – константа, равная $4,52 \cdot 10^6$ Дж/кг;

$M_{\text{г}}$ – масса горючих газов / паров, поступивших в результате аварии в окружающее пространство, кг;

Z – коэффициент участия горючих газов / паров в горении, который допускается принимать равным 0,1.

Импульс волны давления i вычисляется по формуле:

$$i = \frac{123m_{\text{пр}}^{0,66}}{r}, \text{ Па} \cdot \text{с}. \quad (1.28)$$

1.2.5 Методика, используемая в «Системе стандартов безопасности труда. Пожарная безопасность технологических процессов. Общие требования. Методы контроля» ГОСТ Р 12.3.047–2012

В данной методике [9] максимальное избыточное давление и импульс положительной фазы волны сжатия определяется по тем же формулам, что и в приказе МЧС РФ от 10 июля 2009 г. № 404 «Об утверждении методики определения расчетных величин пожарного риска на производственных объектах».

1.3 Анализ существующих методик расчета нагрузок на здания и сооружения при дефлаграционном горении смесей в открытом пространстве

1.3.1 Общая характеристика дефлаграционных взрывов

Дефлаграционные аварийные взрывы в отличие от детонационных взрывов конденсированных взрывчатых веществ (ВВ) и детонационных взрывов газоздушных смесей характеризуются значительно более медленной (дозвуковой) скоростью распространения пламени ϑ . При взрывах больших объемов ГВС в открытом (неограниченном) пространстве наиболее характерными скоростями пламени являются скорости $140 \div 240 \text{ м/с}$.

При дефлаграционном взрыве имеют место 3 зоны действия взрывной волны.

В 1 зоне, расположенной в радиусе $0 < R < R_0$ (R_0 – радиус огненного шара) от центра взрыва, происходит взрывное горение горючей смеси, которое воспринимается со стороны как развитие огненного шара (полушара). В этой зоне на сооружение последовательно действуют взрывная волна, движущаяся перед фронтом пламени, а затем раскаленные до $1600 \div 2000 \text{ }^\circ\text{C}$ продукты взрыва, которые неподвижны. Избыточное давление в продуктах взрыва на $1 \div 3 \%$ меньше, чем

перед фронтом пламени, и оно имеет постоянное значение до окончания взрывного горения. После окончания взрывного горения на здание и сооружение, расположенные в 1 зоне, воздействует давление разрежения, распространяющееся от конечного положения фронта пламени к центру взрыва.

Во 2 зоне, расположенной в интервале $R_0 < R < R_{\text{дог}}$ ($R_{\text{дог}}$ – радиус догона волной разрежения волны сжатия), на здание последовательно воздействует фронт взрывной волны и повышающееся до максимального значения P избыточное давление. После прохождения максимального давления P на здание воздействует понижающееся избыточное давление и затем давление разрежения.

На всем протяжении 1 и 2 зон избыточное давление на фронте взрывной волны $P_{\text{ф}}$ и другие параметры фронта взрывной волны остаются постоянными. Снижение значений указанных параметров с расстоянием, пройденным взрывной волной, начинается на границе 2 и 3 зон при $R = R_{\text{дог}}$ и продолжается при $R > R_{\text{дог}}$.

В то же время на протяжении всей 2 зоны происходит быстрое снижение величин максимального давления P и скоростного напора q соответственно от значений P_{max} и q_{max} на границе с 1 зоной и до значений P_{max} и q_{max} на границе с 3 зоной.

В 3 зоне, располагающейся на расстоянии $R > R_{\text{дог}}$, взрывная волна перестает подпитываться энергией от фронта пламени и превращается в типичную сферическую ударную волну, в которой максимальное давление и другие параметры (скорость потока, плотность, скоростной напор) приходятся на фронт ударной волны. После прохождения фронта ударной волны все параметры в волне снижаются, и затем наступает фаза разрежения [10].

1.3.2 Методики расчёта параметров воздушных волн сжатия при дефлаграционных взрывах, основанные на расчёте параметров волн сжатия от сферы, расширяющейся во времени

Методики определения динамических характеристик воздушной ударной волны (ВУВ) при дефлаграционном горении газозвушных смесей, основанные на расчете параметров волн сжатия от сферы, расширяющейся во времени, кото-

рые моделирует дефлаграционный взрыв в открытом пространстве, подробно излагаются в [11–16]. Рассмотрим основные их положения.

За характерный линейный размер принимается радиус огненного шара (облака продуктов взрыва в момент окончания процесса горения), который определяется по формуле:

$$R_0 = 0,782 \left(\frac{M_{\Gamma} \cdot Z \cdot \varepsilon_{\text{ср}}}{C_{\text{ср}}} \right)^{\frac{1}{3}}, \quad (1.29)$$

$$\varepsilon_{\text{ср}} = 0,5 (\varepsilon_{\text{СТХ}} + \varepsilon_{\text{НКПВ}}), \quad (1.30)$$

$$C_{\text{ср}} = 0,5 (C_{\text{СТХ}} + C_{\text{НКПВ}}), \quad (1.31)$$

где z – доля горючего вещества, участвующая во взрыве ($z = (0,05 \div 0,5)$);

$\varepsilon_{\text{СТХ}}$ – степень расширения продуктов сгорания стехиометрической смеси;

$\varepsilon_{\text{НКПВ}}$ – степень расширения продуктов сгорания при нижнем концентрационном пределе воспламенения смеси;

$C_{\text{СТХ}}$ – концентрация горючего в стехиометрической смеси, кг/м³;

$C_{\text{НКПВ}}$ – нижний концентрационный предел воспламенения смеси, кг/м³.

Максимальные значения избыточного давления ΔP_{max} и значение скоростного напора q_{max} , скорости потока воздуха U_{max} и плотности воздуха ρ_{max} наблюдаются непосредственно в 1 зоне перед фронтом пламени.

Максимальное значение избыточного давления при дефлаграционном взрыве определяется как

$$\Delta P_{\text{max}} = 24,22 \cdot \left[\frac{\vartheta}{140} \right]^{1,822}, \quad \text{при } \vartheta < 140 \text{ м/с}; \quad (1.32)$$

$$\Delta P_{\text{max}} = 24,22 + \left[\frac{\vartheta - 140}{4,745} \right]^{1,232}, \quad \text{при } \vartheta > 140 \text{ м/с}. \quad (1.33)$$

Максимальное значение скоростного напора при дефлаграционном взрыве вычисляется по формуле:

$$q_{\text{max}} = \rho_{\text{max}} \cdot \frac{U_{\text{max}}^2}{2}; \quad U_{\text{max}} = \frac{\vartheta \cdot (\varepsilon_{\text{ср}} - 1)}{\varepsilon_{\text{ср}}}; \quad \rho_{\text{max}} = 1,225 + \left(\frac{\vartheta}{342,8} \right)^{1,786}. \quad (1.34)$$

За фронтом пламени в 1 зоне волны сжатия скоростной напор отсутствует $q_{\max} = 0$ и продукты взрыва неподвижны $U_{\max} = 0$. Избыточное давление определяется по формуле:

$$\Delta P = 0,97 \cdot \Delta P_{\max} . \quad (1.35)$$

Изменение максимального давления ΔP и скоростного напора q соответственно от ΔP_{\max} и q_{\max} на границе с 1-й зоной ($R^0 = R / R_0 = 1,0$) до значений ΔP_{\max} и q_{\max} на границе с 3 зоной ($R = R_{\text{дог}}$) аппроксимируется соотношением:

$$\Delta P = \frac{\Delta P_{\max}}{1 + B(R^0 - 1)^C}; \quad q = 10^Y, \text{ кПа}; \quad Y = A_q \cdot \left[1 - \frac{\ln(R^0)}{\ln(R_q)} \right]^{N_q} + C_q, \quad (1.36)$$

где, параметры B , C , A , R_q , N_q и C_q зависят от видимой скорости пламени и определяются по таблице 1.2.

Таблица 1.2 – Данные для определения параметров волны сжатия в зависимости от скорости распространения фронта пламени

Скорость распространения фронта пламени, ϑ , м/с	Коэффициенты					
	B	C	A_q	R_q	N_q	C_q
70	0,576	1,02	1,73	3,74	1,09	-1,34
80	0,615	0,993	1,97	4,87	1,12	-1,46
90	0,610	0,987	1,79	4,35	1,09	-1,18
100	0,586	1,02	2,03	5,75	1,13	-1,32
110	0,568	1,04	1,86	5,12	1,118	-1,07
120	0,553	1,06	2,14	7,08	1,12	-1,25
130	0,567	1,06	1,97	6,21	1,14	-1,01
140	0,574	1,00	2,34	9,68	1,16	-1,31
150	0,555	1,03	2,14	8,14	1,15	-1,04
160	0,541	1,038	1,96	6,94	1,11	-0,79
170	0,555	1,04	1,79	5,99	1,12	-0,57
180	0,539	1,05	2,57	15,25	1,16	-1,29
190	0,550	1,04	2,26	11,07	1,14	-0,92
200	0,538	1,06	2,01	8,49	1,13	-0,61
210	0,528	1,07	1,79	6,82	1,12	-0,35
220	0,520	1,08	1,62	5,69	1,11	-0,12
230	0,513	1,09	1,47	4,90	1,10	+0,08
240	0,519	1,08	1,34	4,32	1,08	+0,25
250	0,514	1,09	1,23	3,88	1,07	+0,40
260	0,509	1,10	1,14	3,55	1,06	+0,53

В [10, 14] представлены численные методики определения параметров волн сжатия при дефлаграционных взрывах в открытом пространстве, где используются два наиболее распространенных метода решения линейных уравнений, описывающих нестационарные газодинамические потоки: метод Фурье и численный метод, в основу которого положена задача о распаде произвольного разрыва [17].

При использовании метода Фурье для определения параметров волн сжатия при дефлаграционных взрывах в открытом пространстве необходимо задавать скорость потока на границе «огненного шара», что требует знания видимой скорости пламени. Тогда взрывное давление и скорость потока в любой точке пространства определяются по соотношениям:

$$P = p \cdot c^2 \cdot \sum_{m=1}^{m=M} \left(\frac{u_m}{c} \right) \cdot \frac{ika}{(1 + ik_m a)} \cdot \frac{e^{iwm[t - \frac{r-a}{c}]} }{\frac{r}{a}} = \sum_{m=1}^{m=M} P_m, \quad (1.37)$$

$$U = \sum_{m=1}^{m=M} \frac{P_m}{p \cdot c} \cdot \frac{(1 + ik_m r)}{ikr}, \quad (1.38)$$

где $k = 2\pi/(cT)$ – волновое число (T – характерное время);

a – радиус монополя;

c – скорость звука;

r – расстояние от места воспламенения;

$u_m = \frac{2\pi}{T} \int_0^T u_0 \cdot f(t) \cdot e^{iwt} dt$ – преобразование Фурье скорости потока на границе «огненного шара».

Преимущество данного метода в том, что расчет может производиться для произвольной точки пространства, т.е. без вычисления истории события в других точках пространства. Кроме этого, линейная постановка задачи позволяет оценивать воздействие волн сжатия на препятствия без задания их подробной геометрии.

Численный метод определения параметров волн сжатия при дефлаграционных взрывах в открытом пространстве сводится к системе нелинейных уравнений относительно давления P и скорости U среды в точке распада разрыва. Данные величины определяют потоки массы $M_{i,i+1}$ и импульса $I_{i,i+1}$, которыми обменива-

ются соседние расчетные ячейки i и $i+1$.

Расчет плотности и скорости среды в i -й ячейке в момент времени $t + \tau \rightarrow (\rho_i^{n+1}, u_i^{n+1})$ производится через значения плотности и скорости для предыдущего момента времени $t \rightarrow (\rho_i^n, u_i^n)$ по явной разностной схеме:

$$\begin{cases} \rho_i^{n+1} - \rho_i^n + \frac{\tau}{\Delta x} \cdot (M_{i,i+1} - M_{i-1,i}) = 0 \\ (\rho u)_i^{n+1} - (\rho u)_i^n + \frac{\tau}{\Delta x} \cdot (I_{i,i+1} - I_{i-1,i}) = 0 \end{cases} \quad (1.39)$$

Явные формулы для вычисления величин ρ_i^{n+1} , u_i^{n+1} приближенно описывают состояние среды в момент времени $t + \tau$. Если их принять за начальное состояние и опять провести расчет по явной численной схеме, то продвинемся по времени еще на величину τ . В итоге получим приближенное состояние для момента времени $t + \tau + \tau$ и т.д.

1.3.3 Методика определения скорости распространения фронта пламени при дефлаграционных взрывах в открытом пространстве

Из предыдущих выражений следует, что для определения параметров волны сжатия необходимо знать значение скорости распространения фронта пламени дефлаграционного взрыва. Строгое определение значения видимой скорости пламени невозможно из-за влияния на него большого количества факторов и неопределенности начальных условий, что характерно для всех аварийных ситуаций. Однако основные закономерности, присущие поведению скорости распространения фронта пламени дефлаграционного взрыва, можно определить заранее.

В [18, 19] на основании экспериментальных данных взрыва водородо-воздушной смеси, выполненных во ВНИИПО (в том числе и при полигонных испытаниях), было получено соотношение для определения скорости распространения фронта пламени в зависимости от начального радиуса взрывоопасного облака:

$$\vartheta = \vartheta_H \cdot \varepsilon (1 + 0,01\sqrt{Re}), \frac{M}{c}, \quad (1.40)$$

$$Re = \frac{\vartheta_H \cdot r_0}{\nu}, \quad (1.41)$$

где ϑ_n – нормальная скорость горения ГВС

r_0 – радиус сферического облака, м;

ν – коэффициент кинематической вязкости, $\text{м}^2/\text{с}$.

Аналогично структуре формулы (1.40) в работе [10] было получено соотношение, связывающее скорость распространения фронта пламени (при распространении пламени по сфере в неограниченном пространстве) с пройденным пламенем путём (путь разгона) R_p и размером детонационных ячеек Δ :

$$\vartheta = \vartheta_n \cdot \varepsilon \cdot \left(1 + \sqrt{\frac{2}{\Delta} \cdot \frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon} \cdot R_p} \right), \frac{\text{м}}{\text{с}}, \quad (1.42)$$

где ε – степень расширения продуктов сгорания.

В методике [20] определение скорости распространения фронта пламени основано на обобщении многочисленных экспериментальных данных и анализе последствий аварийных взрывов. В ней факторы, влияющие на видимую скорость пламени, условно делятся на две группы: факторы, общие для всех ГВС, и факторы, индивидуальные для каждого вида ГВС. И увеличение значения скорости пламени с увеличением расстояния R_p от места взрыва (разгон пламени) определяется по следующей экспертной формуле:

$$\vartheta = k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot \vartheta_n \cdot \varepsilon \left[1 + \left(\frac{350}{\Delta} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot C^{\frac{1}{6}} \sqrt{R_p} \right], \frac{\text{м}}{\text{с}}, \quad (1.43)$$

где k_1 – коэффициент, учитывающий интенсивность инициирования взрывного горения;

k_2 – коэффициент, учитывающий загроможденность пространства (видов препятствий на пути фронта пламени);

k_3 – коэффициент, учитывающий место воспламенения облака;

C – концентрация газовой смеси, $\text{кг}/\text{м}^3$.

Зависимости (1.42) и (1.43) справедливы до достижения скорости пламени примерно половины скорости звука в открытом пространстве. В дальнейшем в

связи с тем, что все большая доля энергии перераспределяется внутрь огневого шара, темп нарастания замедляется.

В работе [15] скорость распространения фронта пламени рассчитывается по такой же схеме как в (1.43), только формула имеет некоторые доработки:

$$\vartheta_{\text{нв}} = k_1 \cdot k_2 \cdot \vartheta_{\text{н}} \cdot \varepsilon \cdot \left(1 + A \cdot \sqrt{\frac{R_p}{\Delta}} \right)^{\frac{\text{м}}{\text{с}}}, \quad (1.44)$$

где A – функция от $\vartheta_{\text{мин}}$ ($\vartheta_{\text{мин}} = \vartheta_{\text{н}} \cdot \varepsilon$), определяемая по выражениям:

$$\text{если } \vartheta_{\text{мин}} \leq 4 \text{ м/с, то } A = \frac{0,59}{\left[(1 + 0,68(\vartheta_{\text{мин}} - 2,55))^{0,44} \right]}; \quad (1.45)$$

$$\text{если } 15 \geq \vartheta_{\text{мин}} > 4 \text{ м/с, то } A = \frac{0,33}{\left[(1 + 0,16(\vartheta_{\text{мин}} - 4))^{0,43} \right]}. \quad (1.46)$$

Значение пути разгона пламени R_p определяется выражением:

$$R_p = H_{\text{об}} \cdot \sqrt[3]{\varepsilon}, \quad (1.47)$$

где $H_{\text{об}}$ – высота стелящегося облака.

1.4 Сравнение результатов расчётов параметров взрыва по анализируемым методикам

По методикам [7–9] не корректно рассчитывать параметры взрыва ГВС, протекающие в дефлаграционном режиме, так как модель «тротилового эквивалента» не в полной мере отвечает реальным процессам [21]. Поэтому данные методики не используются для расчёта параметров дефлаграционного взрыва.

В данной работе сравнивались расчёты параметров взрыва по методикам, которые чаще используют [5, 6 и 15]. Численные методики из-за своей сложности в реализации не рассматривались.

Выполнив расчёт по [5, 6 и 15], приняв одинаковую скорость распространения фронта пламени, были получены схожие результаты, немного различающиеся на расстояния, близкие к центру взрыва (рисунок 1.5). Это свидетельствует о том, что методики одинаково описывают процесс протекания дефлаграционного взры-

ва. Но так как в методиках [5, 6] определение скорости распространения фронта пламени отличается от предложенного в методике [15], то были выполнены расчёты параметров взрыва для тех же исходных данных, только с учётом определения СРФП. Так, по методикам [5, 6] СРФП равнялась $\vartheta = 200$ м/с, а в [15] $\vartheta = 120$ м/с. Результаты расчётов представлены на рисунке 1.6.

Из рисунка 1.6 хорошо видно, как сильно отличаются значения параметров взрыва. Для одного и того же сценария взрыва по разным методикам мы получаем разные СРФП, а следовательно и разные значения параметров взрыва. Это означает, что при обосновании безопасных расстояний на объектах нефтегазовой отрасли возникает трудность при выборе значений взрывных нагрузок, воздействующих на здания и сооружения. Завышенные параметры взрывной нагрузки приведут к неоправданному удорожанию строительства, а заниженные – к увеличению степени повреждения зданий и сооружений от взрывной нагрузки при аварийном взрыве.

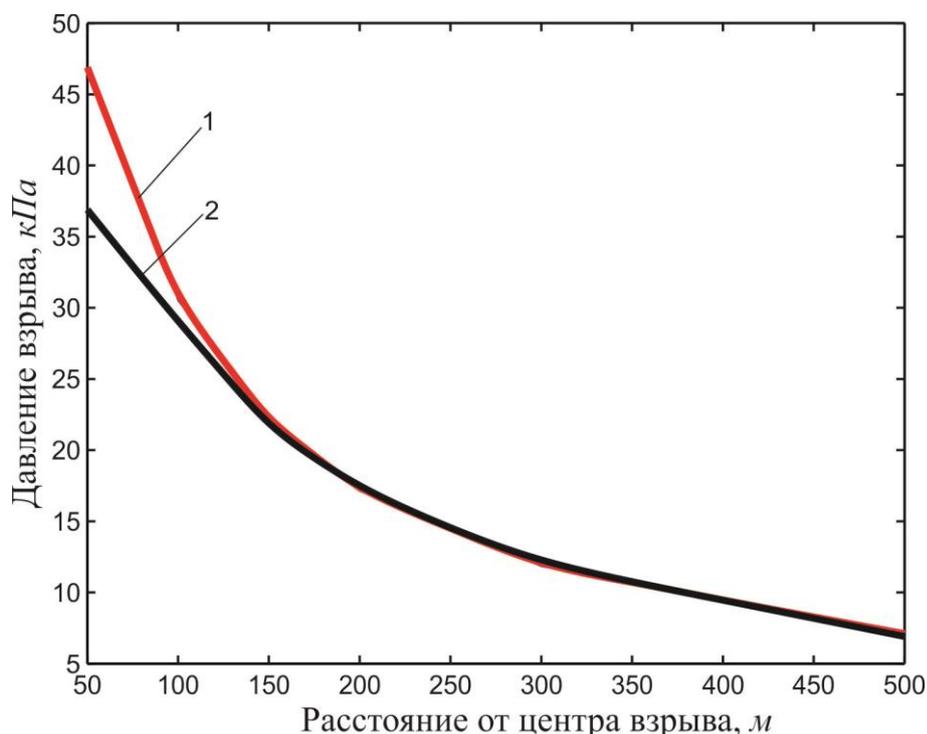


Рисунок 1.5 – Давление взрыва на различном расстоянии от центра взрыва (пропан, $M = 8000$ кг, $W = 200$ м/с):
1 – методика МГСУ, 2 – методика МЧС, Ростехнадзор

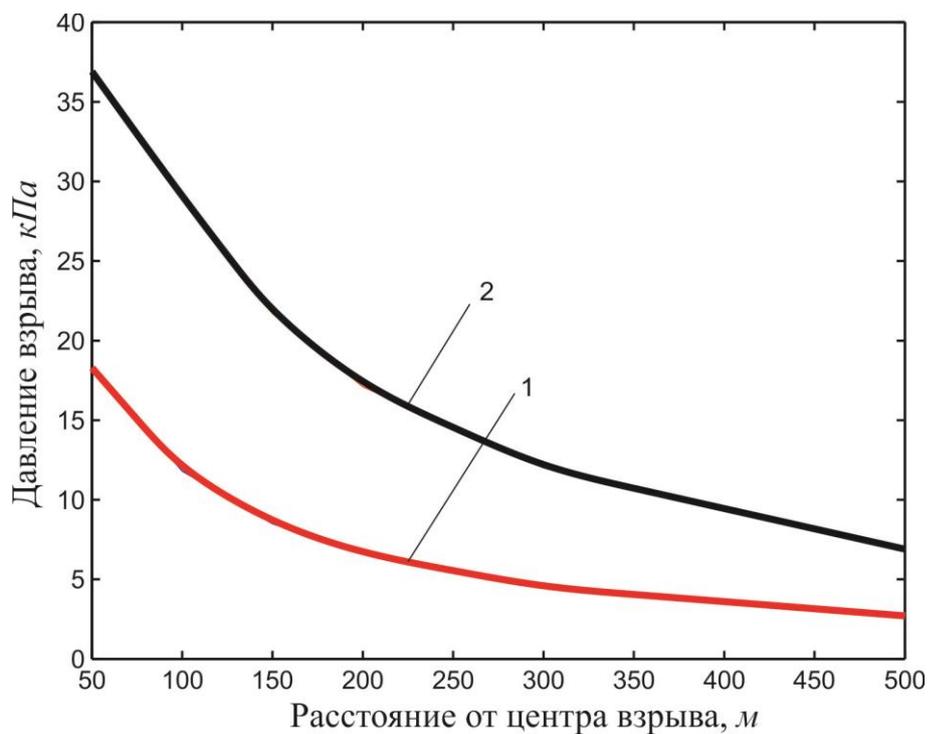


Рисунок 1.6 – Давление взрыва на различном расстоянии от центра взрыва (пропан, $M = 8000$ кг): 1 – методика МГСУ ($W_{пл} = 120$ м/с), 2 – методика МЧС, Ростехнадзор ($W_{пл} = 200$ м/с)

В связи с этим необходимо решить вопрос выбора метода определения СРФП, которая бы правильнее описывала процесс распространения пламени при взрывах ГВС.

Выводы

1. Проведён анализ методик, оценивающих последствия аварийных взрывов ГВС. Из анализа получено, что существует два вида методик: одни основаны на «энергопотенциале» ГВС, другие – на расчёте параметров волн сжатия от сферы, расширяющейся во времени;

2. Результаты расчётов параметров взрыва по методикам [5, 6, 15] при одинаковой СРФП получаются достаточно схожие, немного отличающиеся на расстояниях ближе к месту взрыва;

3. В методиках [5, 6, 15] представлены разные методы к определению СРФП. При расчёте для одного и того же сценария аварийного взрыва, по различным методикам определения СРФП получаются разные значения СРФП. В связи с этим возникает разногласие при определении параметров взрыва ГВС;

4. В связи с вышесказанным возникает необходимость в развитие методик определения СРФП при сгорании ГВС.

ГЛАВА 2 МОДЕЛЬ ФОТОТЕПЛОВОГО ВОСПЛАМЕНЕНИЯ ДЛЯ РАСЧЁТА ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПОЖАРОВЗРЫВООПАСНОСТИ ГАЗОВЫХ СМЕСЕЙ

Мероприятия по обеспечению пожарной безопасности объектов нефтегазового комплекса базируются на расчетах, в которых используются такие показатели пожарной опасности (ППО) как концентрационные пределы распространения пламени, температура самовоспламенения, минимальная энергия зажигания, нормальная скорость распространения пламени, минимальная флегматизирующая концентрация негорючего газа или ингибитора и др. Для многих горючих веществ они экспериментально установлены и приведены в справочной литературе [22]. Большой массив экспериментальных данных позволил разработать расчетные методы определения ППО по эмпирическим формулам, учитывающим элементный состав горючего и в некоторых случаях структуру его молекулы [23–42]. Эти формулы дают возможность оценивать с различной степенью точности численные значения концентрационных пределов распространения пламени, температуру вспышки и др. для горючих веществ, для которых они неизвестны. Как правило, большая сходимость результатов расчета и эксперимента наблюдается в пределах гомологического ряда. Дальнейшее развитие расчетных методов, по-видимому, должно учитывать данные кинетики и механизма химического взаимодействия горючего с окислителем, что, по сути, и определяет способность вещества к воспламенению и горению.

Кинетику и механизм химического взаимодействия применяли при расчете нормальной скорости распространения пламени. Я.Б. Зельдович и Д.А. Франк-Каменецкий разработали тепловую теорию ламинарного пламени [43]. В этой теории они связали кинетику реакции горения с нормальной скоростью. Но допущением теории было, что кинетику химической реакции можно описать одной глобальной реакцией (Горючее → Продукты) и не учитывалось изменение концентрации веществ. Дальнейшее развитие тепловой теории было отражено в работах Я.Б. Зельдовича и Н.Н. Семёнова [44]. Также продолжением развития тео-

рии можно рассматривать работу [45] Т. Кармана и его коллег. В этих работах расчёт нормальной скорости пламени проводился уже с учётом кинетики элементарных реакций и диффузией всех веществ. Это позволяет исследовать процесс, изменяя многие параметры: концентрацию горючего в смеси, давление смеси, температуру смеси.

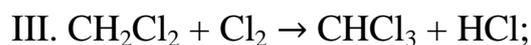
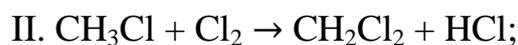
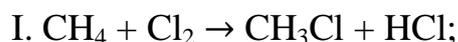
В настоящей главе будет показана возможность увязать показатели пожарной опасности с химической кинетикой процесса, это будет продемонстрировано на примере смесей хлора с метаном, хлорметаном и дихлорметаном.

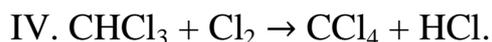
2.1 Математическая модель фототеплового воспламенения

В расчетах исследования принимаются следующие допущения и упрощения реальной термогазодинамической картины процесса и химической кинетики:

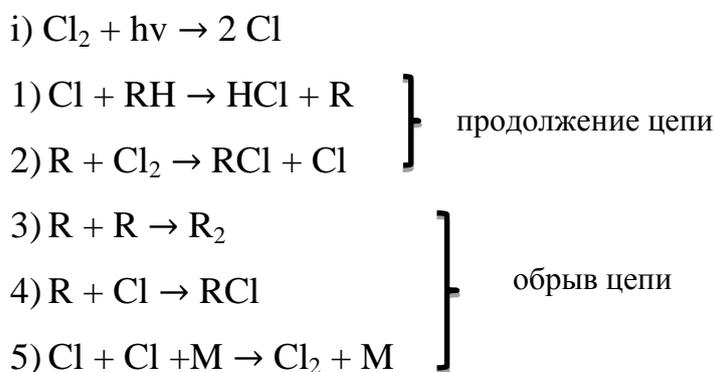
- газовая среда является смесью идеальных газов;
- не учитывается изменение теплоёмкости и теплопроводности смеси в результате образования новых продуктов реакции и их убыли;
- в реакции хлорирования метана и его хлорпроизводных принята упрощённая схема химической кинетики;
- для решений уравнений кинетики химических реакций использован принцип квазистационарных концентраций;
- тепло в смеси распространяется по уравнению теплопроводности и не учитывается уравнение массопереноса.

Хлорирование метана протекает в четыре последовательные стадии замещения атомов водорода на хлор, каждая из которых происходит с участием атомов и радикалов и образованием следующих продуктов: хлорметана (CH_3Cl), дихлорметана (CH_2Cl_2), хлороформа (CHCl_3), тетрахлорметана (CCl_4) и хлористого водорода (HCl):





Данные реакции, в свою очередь, протекают по радикально-цепному механизму с участием атома хлора (Cl) и метильных радикалов (R). В этих реакциях фотодиссоциации подвергаются только молекулы хлора:



Нами рассмотрена следующая схема хлорирования метана, в которой использованы наиболее известные элементарные реакции [46–48] таблица 2.1.

Таблица 2.1 – Элементарные реакции хлорирования метана

№ п/п	Элементарные реакции
i	$\text{Cl}_2 \xrightarrow{h\nu, T} 2\dot{\text{Cl}}$
1.1	$\text{CH}_4 + \dot{\text{Cl}} \rightarrow \text{C}\dot{\text{H}}_3 + \text{HCl}$
1.2	$\text{C}\dot{\text{H}}_3 + \text{Cl}_2 \rightarrow \text{CH}_3\text{Cl} + \dot{\text{Cl}}$
1.3	$\text{C}\dot{\text{H}}_3 + \text{C}\dot{\text{H}}_3 \rightarrow \text{C}_2\text{H}_6$
1.4	$\text{C}\dot{\text{H}}_3 + \dot{\text{Cl}} \rightarrow \text{CH}_3\text{Cl}$
2.1	$\text{CH}_3\text{Cl} + \dot{\text{Cl}} \rightarrow \text{C}\dot{\text{H}}_2\text{Cl} + \text{HCl}$
2.2	$\text{C}\dot{\text{H}}_2\text{Cl} + \text{Cl}_2 \rightarrow \text{CH}_2\text{Cl}_2 + \dot{\text{Cl}}$
2.3	$\text{C}\dot{\text{H}}_2\text{Cl} + \text{C}\dot{\text{H}}_2\text{Cl} \rightarrow \text{C}_2\text{H}_4\text{Cl}_2$
2.4	$\text{C}\dot{\text{H}}_2\text{Cl} + \dot{\text{Cl}} \rightarrow \text{CH}_2\text{Cl}_2$
3.1	$\text{CH}_2\text{Cl}_2 + \dot{\text{Cl}} \rightarrow \text{C}\dot{\text{H}}\text{Cl}_2 + \text{HCl}$
3.2	$\text{C}\dot{\text{H}}\text{Cl}_2 + \text{Cl}_2 \rightarrow \text{CHCl}_3 + \dot{\text{Cl}}$
3.3	$\text{C}\dot{\text{H}}\text{Cl}_2 + \text{C}\dot{\text{H}}\text{Cl}_2 \rightarrow \text{C}_2\text{H}_2\text{Cl}_4$
3.4	$\text{C}\dot{\text{H}}\text{Cl}_2 + \dot{\text{Cl}} \rightarrow \text{CHCl}_3$
4.1	$\text{CHCl}_3 + \dot{\text{Cl}} \rightarrow \text{C}\dot{\text{C}}\text{Cl}_3 + \text{HCl}$
4.2	$\text{C}\dot{\text{C}}\text{Cl}_3 + \text{Cl}_2 \rightarrow \text{CCl}_4 + \dot{\text{Cl}}$
4.3	$\text{C}\dot{\text{C}}\text{Cl}_3 + \text{C}\dot{\text{C}}\text{Cl}_3 \rightarrow \text{C}_2\text{Cl}_6$
4.4	$\text{C}\dot{\text{C}}\text{Cl}_3 + \dot{\text{Cl}} \rightarrow \text{CCl}_4$
5.	$\dot{\text{Cl}} + \dot{\text{Cl}} + \text{M} \rightarrow \text{Cl}_2 + \text{M}$

Из схемы радикально-цепного механизма выведем уравнение скорости химической реакции для каждой стадии [49, 50]. Скорость химической реакции определяется скоростью образования продуктов (HCl, RCl):

$$W_{\text{х.р.}} = \frac{d[\text{HCl}]}{d\tau} = \frac{d[\text{RCl}]}{d\tau} = k_1[\dot{\text{Cl}}][\text{RH}] = k_2[\dot{\text{R}}][\text{Cl}_2], \quad (2.1)$$

где k_i – константа скорости химической реакции на каждой стадии, $\text{м}^3/(\text{моль} \cdot \text{с})$;

$[\text{Cl}_2]$ – концентрация хлора, $\text{моль}/\text{м}^3$;

$[\text{RH}]$ – концентрация углеводорода, $\text{моль}/\text{м}^3$;

$[\dot{\text{Cl}}]$ – концентрация атомов хлора, $\text{моль}/\text{м}^3$;

$[\dot{\text{R}}]$ – концентрация радикалов, $\text{моль}/\text{м}^3$.

Скорость изменения концентраций активных частиц согласно вышеприведенному механизму:

$$\frac{d[\dot{\text{Cl}}]}{d\tau} = W_i - k_1[\dot{\text{Cl}}][\text{RH}] + k_2[\dot{\text{R}}][\text{Cl}_2] - k_4[\dot{\text{R}}][\dot{\text{Cl}}] - k_5[\dot{\text{Cl}}]^2[M], \quad (2.2)$$

$$\frac{d[\dot{\text{R}}]}{d\tau} = k_1[\dot{\text{Cl}}][\text{RH}] - k_2[\dot{\text{R}}][\text{Cl}_2] - k_3[\dot{\text{R}}]^2 - k_4[\dot{\text{R}}][\dot{\text{Cl}}], \quad (2.3)$$

где W_i – скорость иницирования химической реакции, $\text{моль}/(\text{м}^3 \cdot \text{с})$.

Используя принцип квазистационарных концентраций активных частиц можно записать:

$$\frac{d[\dot{\text{Cl}}]}{d\tau} = 0 \text{ и } \frac{d[\dot{\text{R}}]}{d\tau} = 0,$$

тогда (2.2) и (2.3) примут вид:

$$0 = W_i - k_1[\dot{\text{Cl}}][\text{RH}] + k_2[\dot{\text{R}}][\text{Cl}_2] - k_4[\dot{\text{R}}][\dot{\text{Cl}}] - k_5[\dot{\text{Cl}}]^2[M], \quad (2.4)$$

$$0 = k_1[\dot{\text{Cl}}][\text{RH}] - k_2[\dot{\text{R}}][\text{Cl}_2] - k_3[\dot{\text{R}}]^2 - k_4[\dot{\text{R}}][\dot{\text{Cl}}], \quad (2.5)$$

а сложив уравнения (2.4) и (2.5) получим:

$$W_i = k_3[\dot{\text{R}}]^2 + 2k_4[\dot{\text{R}}][\dot{\text{Cl}}] + k_5[\dot{\text{Cl}}]^2[M]. \quad (2.6)$$

Из выражения (2.1) выразим концентрацию радикалов $[\dot{\text{R}}]$ через концентрацию хлора:

$$[\dot{R}] = \frac{k_1 [\dot{Cl}][RH]}{k_2 [Cl_2]}, \quad (2.7)$$

после подстановки выражения (2.7) в (2.6) уравнение (2.6) примет вид:

$$W_i = k_3 \left(\frac{k_1}{k_2}\right)^2 \frac{[\dot{Cl}]^2 [RH]^2}{[Cl_2]^2} + 2k_4 \frac{k_1}{k_2} \frac{[\dot{Cl}][RH]}{[Cl_2]} [\dot{Cl}] + k_5 [\dot{Cl}]^2 M. \quad (2.8)$$

Решая относительно концентрации атомов хлора получим:

$$[\dot{Cl}] = \sqrt{\frac{W_i}{k_3 \left(\frac{k_1}{k_2}\right)^2 \frac{[RH]^2}{[Cl_2]^2} + 2k_4 \frac{k_1}{k_2} \frac{[RH]}{[Cl_2]} + k_5 M}}. \quad (2.9)$$

Подставив выражение (2.9) в уравнение скорости химической реакции (2.1), получим:

$$W_{x.p.} = \sqrt{\frac{W_i k_1^2 [RH]^2 k_2^2 [Cl_2]^2}{k_3 k_1^2 [RH]^2 + 2k_4 k_1 k_2 [Cl_2] [RH] + k_5 k_2^2 [Cl_2]^2 M}}. \quad (2.10)$$

После подстановки констант [49] в знаменатель подкоренного выражения (2.10) было получено, что при температуре в диапазоне $300\text{ K} \div 2000\text{ K}$ и любой концентрации горючего в смеси преобладает перекрёстный обрыв во много раз больший двух других обрывов

$$\begin{aligned} 2k_4 k_1 k_2 [Cl_2] [RH] &\gg k_3 k_1^2 [RH]^2, \\ 2k_4 k_1 k_2 [Cl_2] [RH] &\gg k_5 k_2^2 [Cl_2]^2 M. \end{aligned}$$

Это означает, что реакция протекает с перекрёстным обрывом цепи и обрыв при квадратичной рекомбинации радикалов можно не учитывать. Значит в общей схеме кинетики химической реакции (табл. 2.1) можно не учитывать элементарные реакции 1.3, 2.3, 3.3, 4.3.

Найдём уравнение для скорости химической реакции с учётом упрощённой схемы механизма реакции. Только теперь все элементарные реакции будем рассматривать одновременно.

Из вышеприведённого механизма реакции следует, что скорость изменения концентрации атомов хлора будет равна:

$$d[Cl]/d\tau = W_i - k_{11}[Cl][CH_4] + k_{12}[CH_3][Cl_2] - k_{21}[Cl][CH_3Cl] + k_{22}[CH_2Cl][Cl_2] - k_{31}[Cl][CH_2Cl_2] + k_{32}[CHCl_2][Cl_2] - k_{41}[Cl][CHCl_3] + k_{42}[CCl_3][Cl_2] - k_{14}[CH_3][Cl] - k_{24}[CH_2Cl][Cl] - k_{34}[CHCl_2][Cl] - k_{44}[CCl_3][Cl] - k_5[Cl]^2[M]. \quad (2.11)$$

Учитывая принцип продолжения цепей получим:

$$k_{11}[Cl][CH_4] = k_{12}[CH_3][Cl_2] \quad (2.12)$$

$$k_{21}[Cl][CH_3Cl] = k_{22}[CH_2Cl][Cl_2] \quad (2.13)$$

$$k_{31}[Cl][CH_2Cl_2] = k_{32}[CHCl_2][Cl_2] \quad (2.14)$$

$$k_{41}[Cl][CHCl_3] = k_{42}[CCl_3][Cl_2] \quad (2.15)$$

Тогда уравнение (2.11) примет вид:

$$dCl/d\tau = W_i - k_{14}[CH_3][Cl] - k_{24}[CH_2Cl][Cl] - k_{34}[CHCl_2][Cl] - k_{44}[CCl_3][Cl] - k_5[Cl]^2[M] \quad (2.16)$$

Выразим концентрацию метильных радикалов из уравнений (2.12), (2.13), (2.14), (2.15) и подставим в уравнение (2.16). Уравнение (2.16) примет следующий вид:

$$\frac{dCl}{d\tau} = W_i - \frac{[Cl]^2}{[Cl_2]} \left(\frac{k_{11}k_{14}}{k_{12}} [CH_4] + \frac{k_{21}k_{24}}{k_{22}} [CH_3Cl] + \frac{k_{31}k_{34}}{k_{32}} [CH_2Cl_2] + \frac{k_{41}k_{44}}{k_{42}} [CHCl_3] + k_5[M] \right) \quad (2.17)$$

Анализируя вышеприведённый механизм и используя принцип квазистационарности концентраций активных частиц и равенство скоростей реакций продолжения цепи на каждой стадии получим уравнение для концентрации атомов хлора:

$$[Cl] = \left(\frac{W_i[Cl_2]}{\frac{k_{11}k_{14}}{k_{12}} [CH_4] + \frac{k_{21}k_{24}}{k_{22}} [CH_3Cl] + \frac{k_{31}k_{34}}{k_{32}} [CH_2Cl_2] + \frac{k_{41}k_{44}}{k_{42}} [CHCl_3] + k_5[M]} \right)^{0.5}$$

Тогда скорость каждой последовательной стадии хлорирования:

$$W_I = \frac{d[CH_3Cl]}{d\tau} = k_{11}[CH_4][Cl]; \quad (2.18)$$

$$W_{II} = \frac{d[CH_2Cl_2]}{d\tau} = k_{21}[CH_3Cl][Cl]; \quad (2.19)$$

$$W_{III} = \frac{d[CHCl_3]}{d\tau} = k_{31}[CH_2Cl_2][Cl]; \quad (2.20)$$

$$W_{IV} = \frac{d[CCl_4]}{d\tau} = k_{41}[CHCl_3][Cl]. \quad (2.21)$$

Скорость химической реакции зависит от скорости инициирования. При низких температурах реакционной смеси образование начальных активных центров реакции происходит в результате фотодиссоциации молекул хлора. По мере прохождения излучения вглубь реакционной смеси интенсивность излучения уменьшается в соответствии с законом Бугера – Ламберта – Бера:

$$I = I_0 \cdot \exp(-\varepsilon \cdot [Cl_2] \cdot x), \quad (2.22)$$

где I_0 – начальная интенсивность излучения, $I_0 = 2 \cdot 10^{21}$ квант/($m^2 \cdot c$);

ε – средневзвешенный коэффициент поглощения излучения хлором;

x – расстояние, изменяющееся от 0 до L .

Ранее нами проводились измерения интенсивности света лампы ДРТ-1000 в направлении светового потока в непоглощающей излучение среде и установлено, что коэффициент ослабления интенсивности излучения в результате его рассеивания аппроксимируется уравнением [49]:

$$K_{oc} = \exp(-10,59 \cdot x), \quad (2.23)$$

учитывая уравнения (2.22) и (2.23) скорость инициирования примет вид:

$$W_i^\phi = 2 \varepsilon [Cl_2] \cdot I_0 \cdot K_{oc} \cdot \exp(-\varepsilon \cdot [Cl_2] \cdot x) \quad (2.24)$$

На рисунке 2.1 показано, как изменяется скорость образования атомов хлора с увеличением слоя смеси.

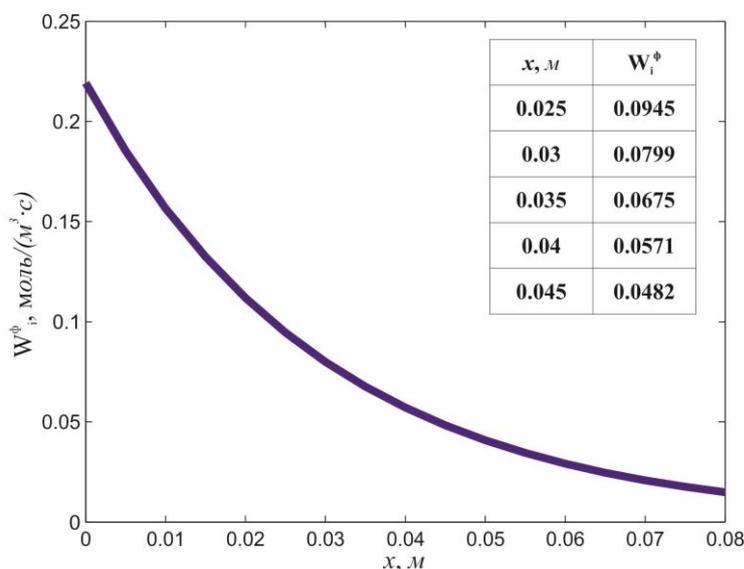


Рисунок 2.1 – Изменение скорости фотоиницирования химической реакции вдоль направления светового потока

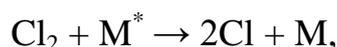
при $\tau = 0$ с.

($I_0 = 2 \cdot 10^{21}$ квант/($m^2 \cdot c$),

$[Cl_2] = 41$ %(об.))

Следует иметь в виду, что приведенная зависимость рисунка 2.1 имеет место в начальный момент времени ($\tau = 0$), а по мере расходования в реакции хлора скорость фотоинициирования в дальних слоях смеси будет повышаться вследствие увеличения оптической прозрачности среды.

При высокой скорости реакции хлорирования рост температуры вследствие саморазогрева смеси приводит к увеличению термической диссоциации молекул хлора (рисунок 2.2):



скорость которой равна:

$$W_i^T = 2k_T \exp\left(-\frac{E_T}{RT}\right) [\text{M}][\text{Cl}_2], \quad (2.25)$$

где k_T – константа скорости термической диссоциации;

E_T – энергия активации, Дж/моль;

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

$[\text{M}]$ – общая концентрация молекул в смеси, моль/м³;

Сравнение рисунков 2.1 и 2.2 приводит к выводу, что скорости фотохимической и термической диссоциации сопоставимы при температуре смеси 850–900 К. При достижении такой температуры и дальнейшем её росте происходит резкое ускорение химической реакции вследствие увеличения числа активных частиц атомов хлора и воспламенение смеси.

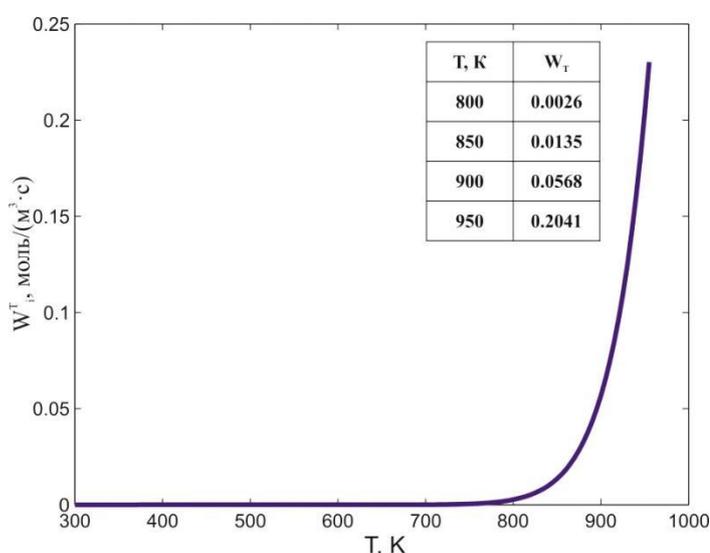


Рисунок 2.2 – Зависимость скорости термического инициирования от температуры

Учитывая вышеизложенное, отметим, что в модели скорость инициирования складывается из двух составляющих – фотохимической и термической:

$$W_i = W_i^\phi + W_i^T \text{ или}$$

$$W_i = 2\varepsilon[\text{Cl}_2] \cdot I_0 \cdot K_{oc} \cdot \exp(-\varepsilon \cdot [\text{Cl}_2] \cdot x) + 2k_T \exp\left(-\frac{E_T}{RT}\right) [M][\text{Cl}_2]. \quad (2.26)$$

Такое представление скорости инициирования позволяет анализировать тепловое воспламенение и для случаев, когда фотохимическое инициирование отсутствует. Например, при самовоспламенении или зажигании от нагретого тела.

Анализ составляющих скорости инициирования позволяет заключить, что при невысоких температурах ($T < 800$ К) фотохимическая реакция происходит при постоянной скорости инициирования $W_i = W_i^\phi$ и взрыв в системе развивается как чисто тепловой, вызванный разбалансом скорости тепловыделения и теплоотвода. А при достижении температуры смеси ~ 900 К и дальнейшем её росте скорость инициирования целиком определяется термической диссоциацией, которая экспоненциально увеличивается с повышением температуры. С этого момента в реакционной смеси происходит прогрессирующий рост числа активных частиц, и развивающийся в системе взрыв становится цепно-тепловым.

Определив все параметры, от которых зависит скорость химической реакции, можно записать общую скорость тепловыделения при протекании химических реакций:

$$q = W_I \cdot Q_I + W_{II} \cdot Q_{II} + W_{III} \cdot Q_{III} + W_{IV} \cdot Q_{IV}, \quad (2.27)$$

где, $W_I, W_{II}, W_{III}, W_{IV}$ – скорости образования хлорметана, дихлорметана, трихлорметана и тетрахлорметана;

$Q_I, Q_{II}, Q_{III}, Q_{IV}$ – тепловые эффекты этих реакций, рассчитанные по закону Гесса (теплоты образования веществ для расчёта взяты из [51])

Чтобы получить температурную зависимость от времени $T(\tau)$ в точке реакционного сосуда, необходимо совместно решать уравнение теплопроводности и уравнение скорости тепловыделения (2.27) [52].

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\lambda}{c\rho} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} \right) + \frac{q(1 - \eta)}{c\rho}, \quad (2.28)$$

где λ , c , ρ – коэффициент теплопроводности, молярная теплоёмкость и плотность реакционной смеси;

η – коэффициент теплопотерь;

x , r – координаты точки в цилиндрическом реакционном сосуде.

Для расчёта коэффициента теплопроводности газовой смеси использовали правило аддитивности:

$$\lambda_{\text{см}} = \sum_{i=1}^n (\lambda_i \cdot x_i), \quad (2.29)$$

где $\lambda_{\text{см}}$ – теплопроводность смеси газов, Вт/(м·К);

λ_i – теплопроводность i -го компонента смеси;

x_i – мольная доля i -го компонента смеси;

n – количество компонентов.

Также учтена зависимость теплопроводности газовой смеси от температуры, которая рассчитывалась по уравнению:

$$\lambda = \lambda_{\text{см}} \cdot \frac{T}{T_0}, \quad (2.30)$$

где T – температура в точке рассматриваемой смеси;

T_0 – начальная температура смеси.

Из-за отсутствия справочной информации по теплопроводности хлорметана, дихлорметана, трихлорметана, тетрахлорметана в модели учитывалась теплопроводность только метана и хлора (таблица 2.2 [53]).

Таблица 2.2 – Теплопроводность метана и хлора

Наименование	Теплопроводность, Вт/(м·К)
Метан (CH ₄)	$3,22 \cdot 10^{-2}$
Хлор (Cl ₂)	$0,88 \cdot 10^{-2}$

Значение теплоёмкости газовой смеси, как и значение теплопроводности, пропорционально массовой доле компонента:

$$c_{\text{см}} = \sum_{i=1}^n (c_i \cdot x_i), \quad (2.31)$$

где $c_{см}$ – теплоёмкость смеси, Дж/(моль·К);

c_i – теплоёмкость i -го компонента смеси;

x_i – мольная доля i -го компонента смеси;

n – количество компонентов.

При расчёте зависимости теплоёмкости веществ от температуры были использованы данные, представленные в National Institute of Standards and Technology [54]:

$$c_p = A + B \cdot t + C \cdot t^2 + D \cdot t^3 + E/t^2, \quad (2.32)$$

где c_p – изобарная теплоёмкость;

A, B, C, D, E – эмпирические коэффициенты;

t – температура (К)/1000.

Коэффициент теплопотерь в соответствии с законом Стефана – Больцмана принимали пропорциональным $\sim T^4$ и находили его значение, основываясь на величине температуры горения и доли теплопотерь, приведённых в работах А.И. Розловского [55, 56]. Его значение составило $\eta = 1,9 \cdot 10^{-14} \cdot T^4$.

Изменение плотности смеси при её разогреве учитывали вводя множитель $(\frac{T_v}{T})$ для концентрации каждого компонента реагирующей смеси. Здесь T_v среднеобъёмная температура смеси в сосуде, а T – температура в рассматриваемой точке. Температуру стенок сосуда принимали постоянной, равной T_0 .

Решение дифференциального уравнения теплопроводности проводили численным методом с использованием конечных разностей с равномерной сеткой и явной конечно-разностной схемы. Шаг интегрирования по временной координате выбирали из условия устойчивости [57, 58]:

$$\Delta\tau < \frac{\rho c \Delta h^2}{2\lambda}, \quad (2.33)$$

где Δh – шаг по координате.

На каждом временном шаге, имея в качестве исходных данных концентрацию хлора и температуру в каждой рассматриваемой точке, по уравнению (2.26) устанавливали значение скорости иницирования. Потом из уравнения (2.17) определяли концентрацию атомов хлора в каждой точке $[Cl]_{i,j}$. Подставляя

в уравнения (2.18–2.21) определяли скорость каждой последовательной стадии хлорирования. Приращение концентрации образовавшихся веществ за время $\Delta\tau$: $\Delta[\text{CH}_3\text{Cl}]_{i,j}$, $\Delta[\text{CH}_2\text{Cl}_2]_{i,j}$, $\Delta[\text{CHCl}_3]_{i,j}$, $\Delta[\text{CCl}_4]_{i,j}$ и исходные концентрации компонентов реакционной смеси для следующего шага рассчитывали так:

$$[\text{CH}_4]_{i,j} = [\text{CH}_4]_{i,j} - \Delta[\text{CH}_3\text{Cl}]_{i,j} - \text{концентрация метана на следующий шаг}; \quad (2.34)$$

$$[\text{CH}_3\text{Cl}]_{i,j} = [\text{CHCl}_3]_{i,j} + \Delta[\text{CH}_3\text{Cl}]_{i,j} - \Delta[\text{CH}_2\text{Cl}_2]_{i,j} - \text{концентрация хлорметана на следующий шаг}; \quad (2.35)$$

$$[\text{CH}_2\text{Cl}_2]_{i,j} = [\text{CH}_2\text{Cl}_2]_{i,j} + \Delta[\text{CH}_2\text{Cl}_2]_{i,j} - \Delta[\text{CH}_3\text{Cl}]_{i,j} - \text{концентрация дихлорметана на следующий шаг}; \quad (2.36)$$

$$[\text{CHCl}_3]_{i,j} = [\text{CHCl}_3]_{i,j} + \Delta[\text{CHCl}_3]_{i,j} - \Delta[\text{CH}_2\text{Cl}_2]_{i,j} - \text{концентрация трихлорметана на следующий шаг}; \quad (2.37)$$

$$[\text{CCl}_4]_{i,j} = [\text{CCl}_4]_{i,j} + \Delta[\text{CCl}_4]_{i,j} - \text{концентрация тетрахлорметана на следующий шаг}; \quad (2.38)$$

$$[\text{Cl}_2]_{i,j} = [\text{Cl}_2]_{i,j} - \Delta[\text{CH}_3\text{Cl}]_{i,j} - \Delta[\text{CH}_2\text{Cl}_2]_{i,j} - \Delta[\text{CHCl}_3]_{i,j} - \Delta[\text{CCl}_4]_{i,j} - \text{концентрация хлора на следующий шаг}; \quad (2.39)$$

Скорость тепловыделения рассчитывали по уравнению (2.29), в котором:

$$\begin{aligned} W_{\text{I}} &= \Delta[\text{CH}_3\text{Cl}]_{i,j} / \Delta\tau; \quad W_{\text{II}} = \Delta[\text{CH}_2\text{Cl}_2]_{i,j} / \Delta\tau; \quad W_{\text{III}} = \Delta[\text{CHCl}_3]_{i,j} / \Delta\tau; \\ W_{\text{IV}} &= \Delta[\text{CCl}_4]_{i,j} / \Delta\tau; \end{aligned} \quad (2.40)$$

В результате решения уравнений теплопроводности были получены температурные поля в реакционном сосуде на различные моменты времени. При решении задачи была использована система MATLAB и программа для компьютерного счёта [59, 60].

2.2 Методика эксперимента

Исследование показателей пожаровзрывоопасности горючей смеси метана с хлором при воздействии ультрафиолетового излучения проводили на установке, схема которой изображена на рисунке 2.3.

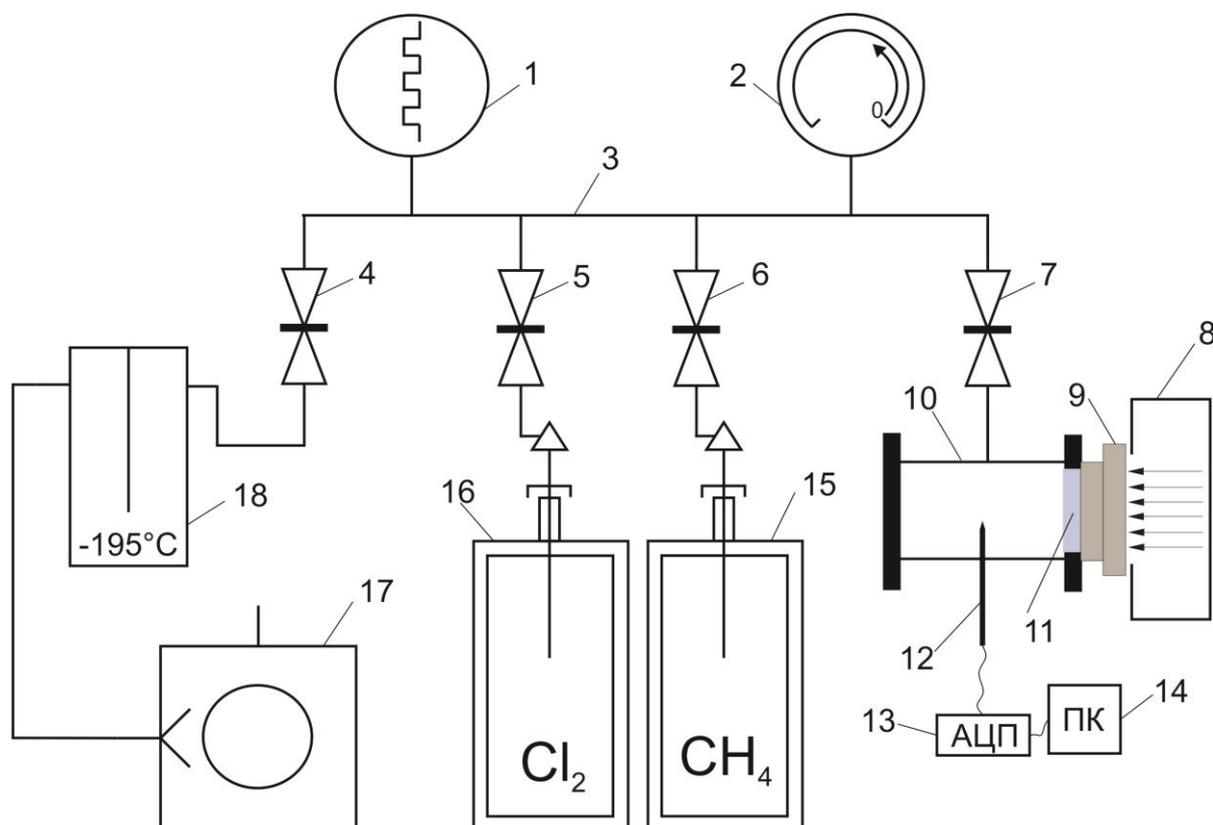


Рисунок 2.3 – Схема экспериментальной установки:

- 1, 2 – вакуумметр; 3 – магистральная линия; 4–7 – задвижки; 8 – источник света;
 9 – механический затвор; 10 – реакционный сосуд; 11 – кварцевое стекло;
 12 – термопара; 13 – аналого-цифровой преобразователь;
 14 – персональный компьютер; 15, 16 – баллоны с реагентами;
 17 – вакуумный насос; 18 – ловушка

Реагенты хранятся в стальных баллонах 15, 16, которые подключены к магистральной линии 3. Все линии магистрали выполнены из нержавеющей стали. В качестве запорных вентилей используются краны Гоффера 4–7. Прокладочным материалом служит тефлон, вакуумные смазки не применялись.

Реакционный сосуд (сосуд) 10, куда производится набор реагентов, выполнен из нержавеющей стали в форме цилиндра. С торцов сосуд герметично закрыт фланцами. В одном фланце для пропускания ультрафиолетового излучения установлено кварцевое стекло 11. Для присоединения термодпар 12 на сосуде установлены штуцера. Во время эксперимента сосуд находится в горизонтальном положении для уменьшения влияния конвекции на процесс распространения тепла. Сосуд соединён с магистральной линией и вакуумной системой. Источником ультрафиолетового излучения 8 служит дуговая ртутная трубчатая лампа мощностью 1 кВт ДРТ-1000. Интенсивность падающего света ртутной лампы была измерена с помощью ферриоксалатной актинометрии и составила $I_0 = 2 \cdot 10^{21}$ квант/($\text{м}^2 \cdot \text{с}$). Для уменьшения интенсивности света использовали металлические сетки. Коэффициент ослабления сеток измерен с помощью люксметра. Результаты измерений приведены в таблице 2.3.

Таблица 2.3 – Изменение интенсивности излучения

№ п/п	Количество сеток в тубусе, шт.	Коэффициент ослабления, I/I_0
1.	1	0,50
2.	2	0,33
3.	3	0,25
4.	4	0,17

Для создания вакуума в системе используется вакуумный пластинчатороторный насос 17 2НВР-5ДМ, создающий предельное остаточное давление в $2 \cdot 10^{-2}$ мм.рт.ст. Для контроля давления в системе применяется электронный вакуумметр Мерадат ВИТ12-Т3 с тепловым датчиком 1 ПМТ-6-3М-1.

Набор реагентов в сосуд осуществляется поочередно. Концентрация горючего в окислителе рассчитывается по законам Дальтона и Менделеева – Клайперона:

$$P = \sum_{i=1}^n p_i, \quad (2.41)$$

где P – давление смеси;

p_i – парциальное давление i -го компонента;

$$p \cdot V = \nu \cdot R \cdot T, \quad (2.42)$$

где p – давление;

V – объем сосуда;

ν – количество вещества;

R – газовая постоянная;

T – температура.

Дозировка веществ осуществляется по давлению с помощью образцового вакуумметра 2 ВО-1227 с классом точности 0,25.

Температура регистрируется с помощью вольфрам-рениевых термопар, позволяющих регистрировать температуру в интервале $0 \text{ }^\circ\text{C} \div 2500 \text{ }^\circ\text{C}$. Градуировка термопар соответствует ТВР А-1. Для минимизации инерционности термопары применяется проволока диаметром 20 мкм. Спай термопары располагается по центральной оси сосуда. Регистрация э.д.с. термопары производится аналого-цифровым преобразователем (АЦП) 13 ЛА-20USB, сигнал от которого поступает на персональный компьютер 14. Для обработки полученных данных э.д.с. с АЦП и преобразования в значение температуры от времени $T = f(\tau)$ применяется программный комплекс PowerGraph.

В начале проведения эксперимента краны 5,6 закрыты. Соединительные линии, идущие от баллонов к кранам 5, 6, заполнены соответствующими веществами. Затем в магистральной линии и реакционном сосуде создается необходимое остаточное давление и закрывается кран 4. После чего открывается кран 6 и производится набор необходимого количества горючего (метан), краны 6 и 7 закрываются. Открывается кран 4 и создается необходимое остаточное давление в магистрали, закрываем кран 4. Открываем кран 5 с окислителем (хлор) и набираем в магистральную линию до давления, превышающего давление в реакционном сосуде. Открываем кран 7 и набираем необходимое количество окислителя, краны 5 и 7 закрываем. Для равномерного диффузионного перемешивания веществ смеси, приготовленная смесь в сосуде выдерживается в течение времени, которое определяется по формуле:

$$\tau_{\text{п}} = L^2/D,$$

где $\tau_{\text{п}}$ – диффузионное время релаксации в газах, с;

L – наибольший линейный размер сосуда, м;

D – наименьший коэффициент диффузии из газов, м²/с.

Для сосуда длиной 0,04 м и диаметром 0,036 мм (короткий сосуд) время релаксации составляет 3 минуты.

При температуре 20°C ÷ 30°C и отсутствии УФ-излучения смесь не реагирует. Открывается механический затвор 9, открытие затвора составляет 10⁻³ с, производится регистрация изменения $T = f(\tau)$.

После проведения эксперимента открываются краны 4 и 7 и производится откачка продуктов реакции через ловушку 18, помещённую в жидкий азот. При достижении необходимого остаточного давления кран 4 закрывается. Реакционный сосуд разбирается и промывается изопропиловым спиртом. Если смесь не прореагировала, то разборка сосуда не производится. Новый эксперимент проводится аналогично написанному выше.

Смороженные вещества в ловушке нейтрализуются с помощью водного раствора тиосульфата натрия.

Определение погрешности эксперимента

Погрешность в определение температуры смеси обусловлена приборной погрешностью, погрешностью тарировки термопар и погрешностью измерительного прибора АЦП ЛА – 20USB.

Согласно паспортным данным на АЦП ЛА – 20USB относительное значение систематической составляющей погрешности составляет 0,2 %. Погрешность тарировки термопар типа ТВР А-1 в соответствии с [61] не превышает 1 %. По методике, приведенной в работе [62], определена погрешность, обусловленная термической инерцией спаев термопар, которая не превышает 2 %. Пределы допускаемой погрешности при наборе реагентов вакуумметром ВО-1227 согласно [63] составляет 0,25 %.

Суммарная погрешность определения температуры смеси в сосуде складывается из погрешностей, обусловленных погрешностью измерительной части АЦП LA – 20 USB (0,2 %), погрешностью тарировки термопар (1 %) и термической инерционностью спая термопар (2 %), и погрешностью при наборе компонентов смеси (0,25 %). Если набираемая горючая смесь состоит из N компонентов, то погрешность при наборе определяется как $0,25 \cdot N$ %. То есть погрешность эксперимента не превышает 4 %.

2.3 Экспериментальные значения предельных параметров воспламенения смесей метана с хлором

На рисунке 2.4 показаны температурные кривые $T(\tau)$, полученные в смесях метана с хлором. По этим кривым устанавливали максимальную температуру разогрева смеси (T_{\max}) и строили зависимость T_{\max} от концентрации горючего в смеси.

Максимальная температура разогрева составила 1627 К при содержании 35 %(об.) метана в смеси с хлором. Газовая смесь метана с хлором стехиометрического состава может варьироваться в зависимости от того, до какого продукта прошла реакция:



Из приведённых брутто-реакций ясно, что газовая смесь метана с хлором стехиометрического состава может быть при содержании в ней метана 20, 25, 33 и 50 %(об.).

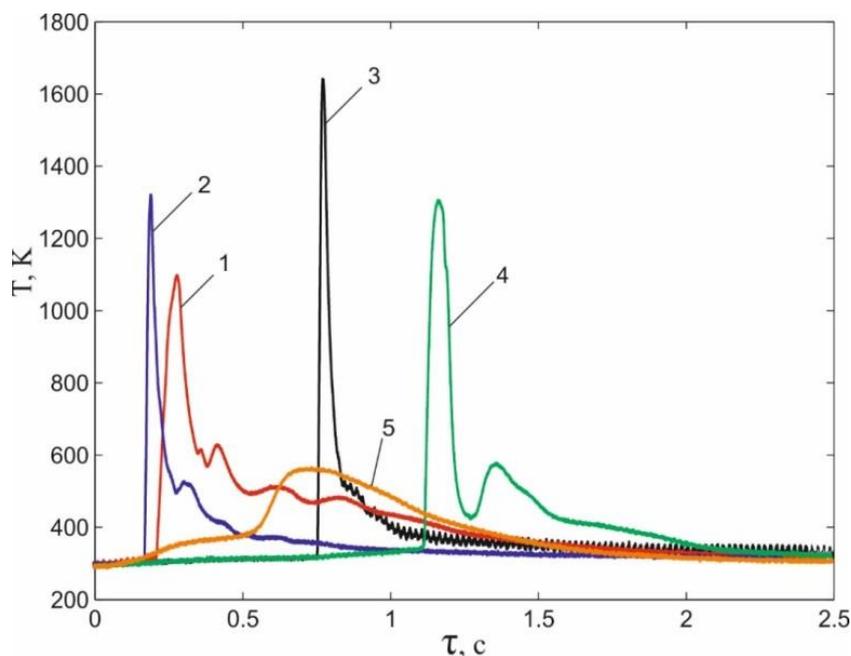


Рисунок 2.4 – Изменение температуры от времени в центре реакционного сосуда при максимальной интенсивности УФ-излучения на смеси с разной мольной долей метана в смеси с хлором:

1 – 0,1; 2 – 0,2; 3 – 0,35; 4 – 0,5; 5 – 0,7

На рисунке 2.5 показаны зависимости, полученные при различных интенсивностях УФ-излучения. Нижний концентрационный предел распространения пламени выражен очень хорошо по сравнению с верхним концентрационным пределом. Поэтому для определения концентрационных пределов, при отсутствии критичности, за критерий воспламенения принимали температуру равную 800 К (минимальная температура пламени в таких смесях). При максимальной интенсивности света концентрационная область фотовоспламенения (*линия 1*) составила 7,5–62 %(об.). С уменьшением интенсивности УФ-излучения критичность концентрационной области фотовоспламенения уменьшается, это особенно хорошо заметно со стороны нижнего концентрационного предела (*линии 2, 3*). При интенсивности света $I = 0,17 \cdot I_0$ смеси метана с хлором не воспламенялись (*линия 5*).

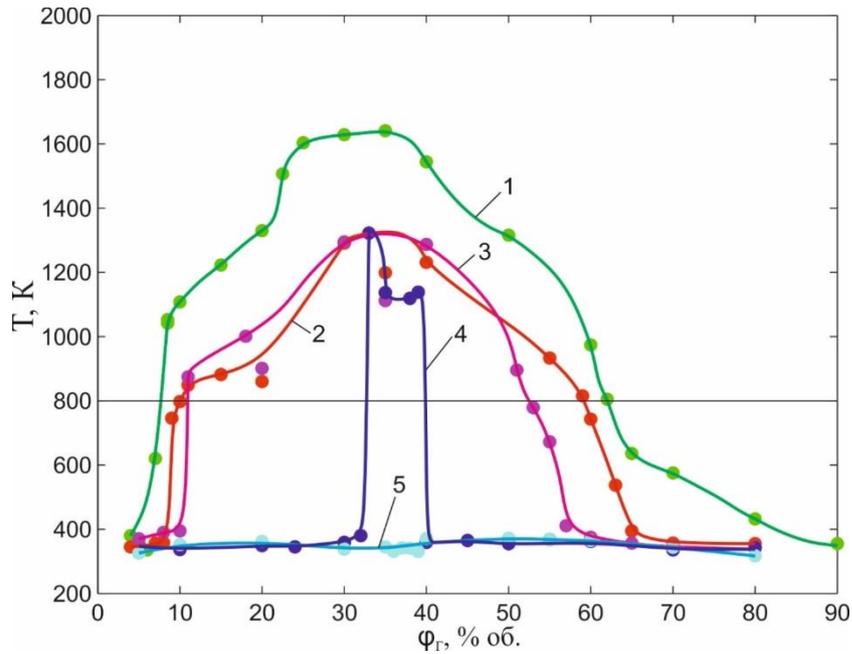


Рисунок 2.5 – Зависимости максимальной температуры разогрева смеси от начального содержания метана $\phi_{\text{Г}}$ при различных интенсивностях УФ-излучения:

$$1 - I = I_0; 2 - I = 0,5 \cdot I_0; 3 - I = 0,33 \cdot I_0; 4 - I = 0,25 \cdot I_0; 5 - I = 0,17 \cdot I_0$$

Из полученных по рисунку 2.5 данных строится область воспламенения смесей метана с хлором при облучении их УФ-излучением (рисунок 2.6).

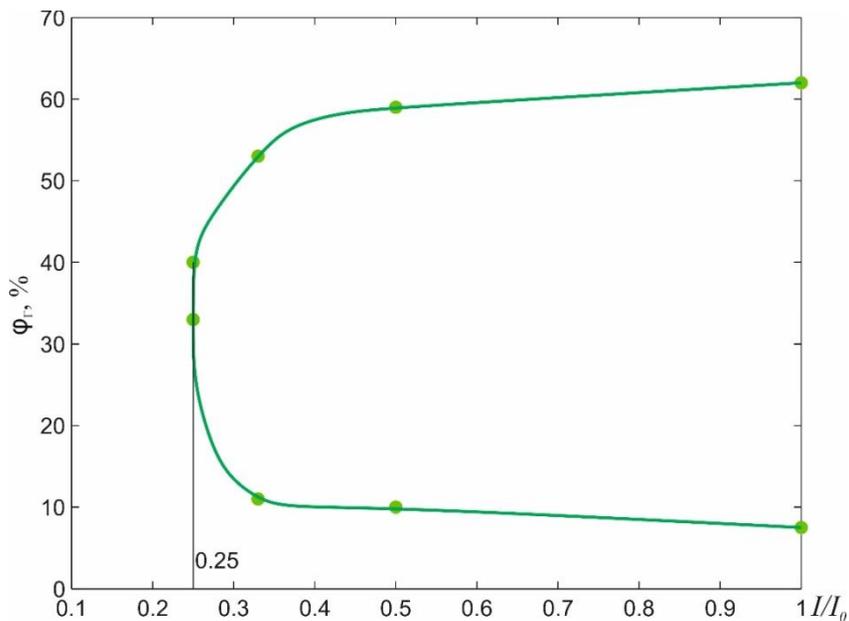


Рисунок 2.6 – Зависимость концентрационной области фототеплового воспламенения смеси $\text{CH}_4 + \text{Cl}_2$ от интенсивности УФ-излучения

Также по рисунку 2.6 для смеси метана с хлором установлена критическая интенсивность УФ-излучения. Она составила около $0,25 I_0$.

На рисунке 2.7 представлены графики времени достижения максимальной температуры смеси $0,35\text{CH}_4 + 0,65\text{Cl}_2$ при различной интенсивности УФ-излучения. Из анализа графиков отчётливо видно, что с уменьшением интенсивности УФ-излучения растёт период достижения максимальной температуры смеси. Это связано с тем, что при уменьшении интенсивности УФ-излучения уменьшается скорость диссоциации молекул хлора, а следовательно и скорость химической реакции.

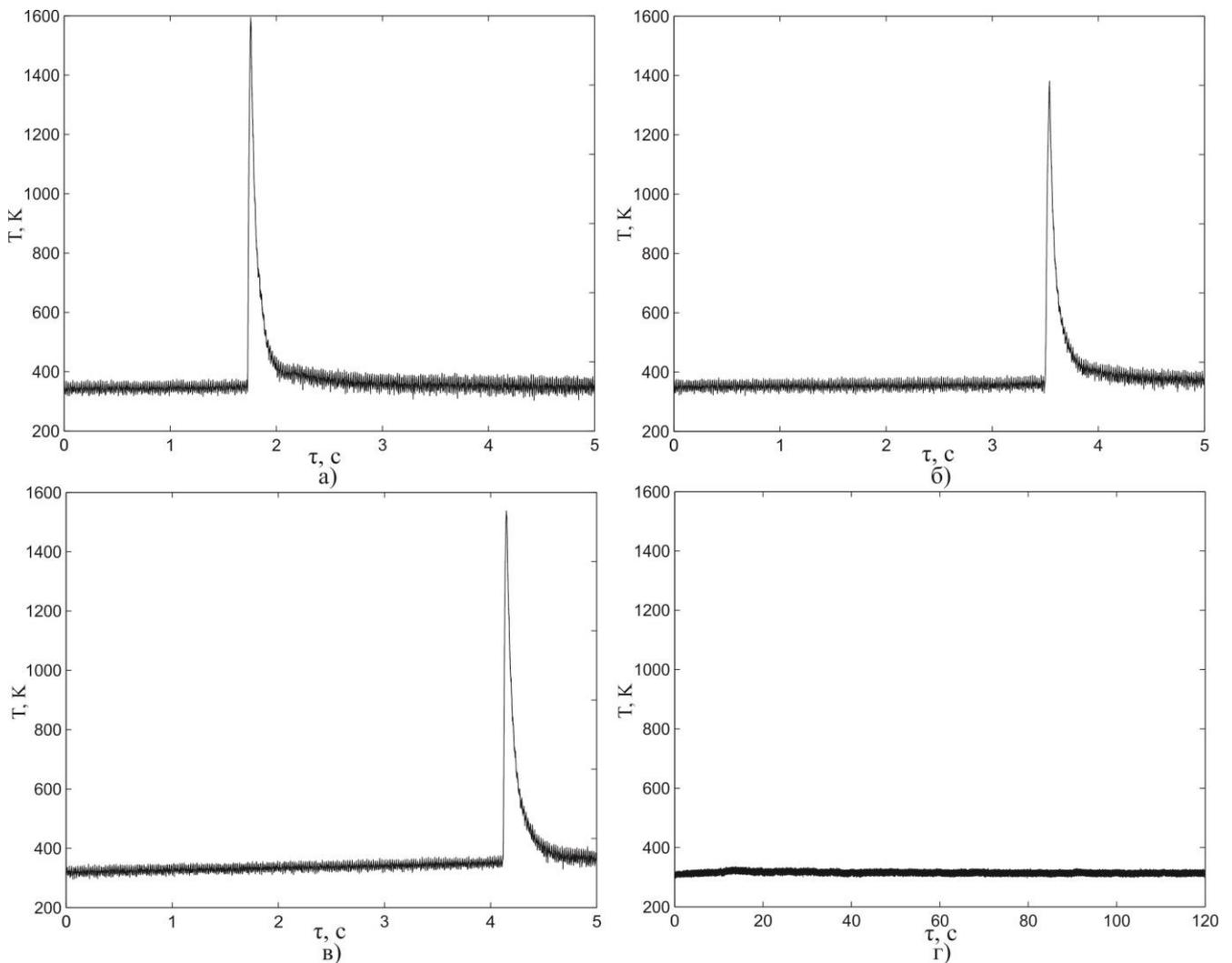


Рисунок 2.7 – Период индукции реакции смеси $0,35\text{CH}_4 + 0,65\text{Cl}_2$ в зависимости от интенсивности УФ-излучения: а) $I = I_0$; б) $I = 0,5I_0$; в) $I = 0,25I_0$; г) $I = 0,17I_0$

2.4 Апробация математической модели фототеплового воспламенения

Проверку расчётов модели сравнивали с экспериментальными данными, полученными для смесей метана, хлорметана и дихлорметана с хлором [50, 64].

На рисунке 2.8 представлены температурные поля, показывающие процесс развития воспламенения смеси в цилиндрическом сосуде радиусом $1,8 \cdot 10^{-2}$ м и длиной $4,0 \cdot 10^{-2}$ м.

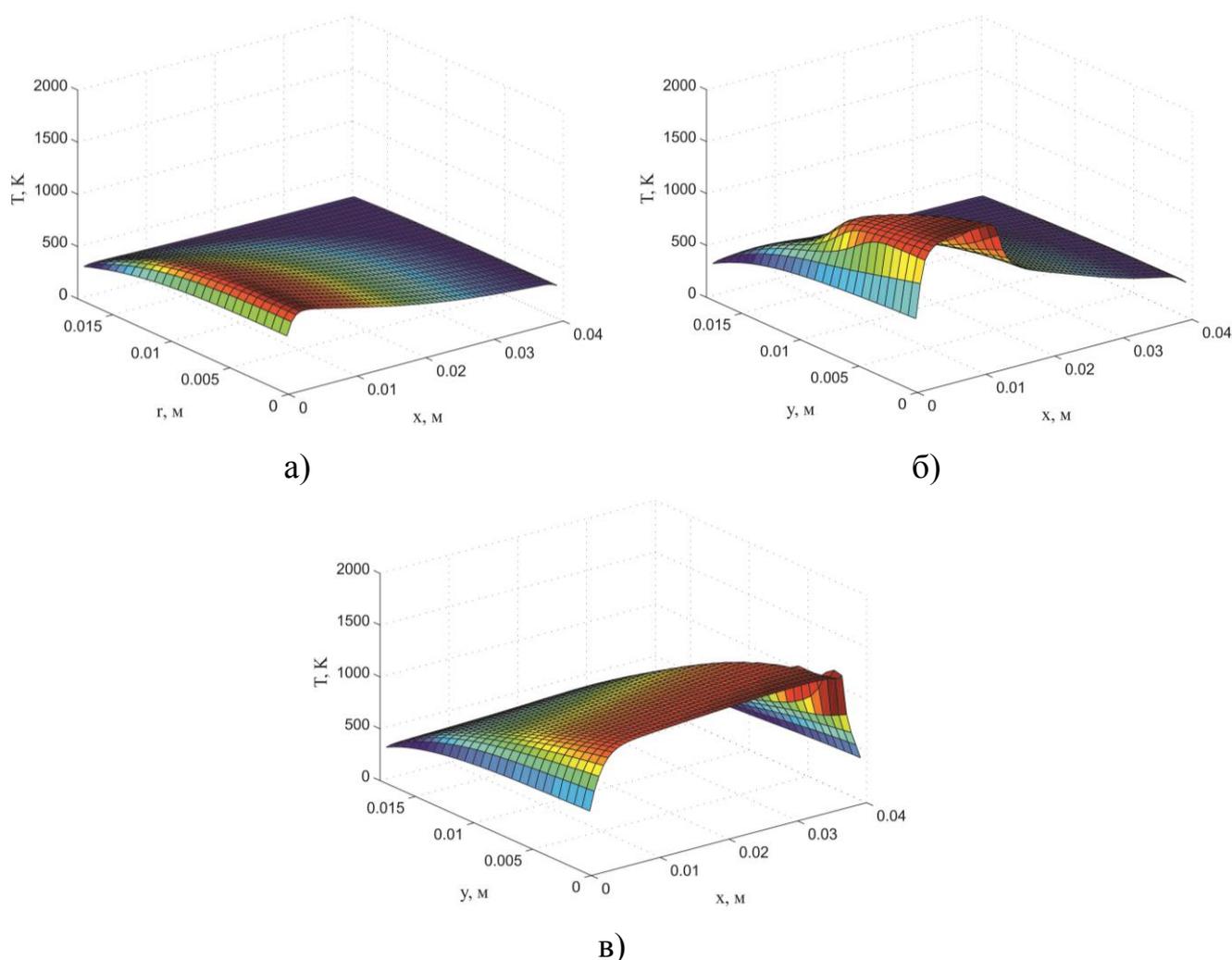


Рисунок 2.8 – Температурное поле в смеси $0,35\text{CH}_4 + 0,65\text{Cl}_2$ на различные моменты времени от начала облучения УФ-излучением максимальной интенсивности: а) 0,209 с; б) 0,293 с; в) 0,460 с

Смесь начинает разогреваться вблизи кварцевого стекла, а затем с увеличением температуры смеси происходит её воспламенение и распространение пламени в глубину сосуда. Это говорит о правильном расчёте моделью процесса вос-

пламенения смеси метана с хлором при воздействии на неё ультрафиолетовым излучением.

На рисунке 2.9 представлены расчётные кривые, показывающие изменение температуры в смеси метана и хлора в центре реакционного сосуда при действии УФ-излучения различной интенсивности. Снижение интенсивности облучения приводит к уменьшению скорости тепловыделения и температуры максимального разогрева. При интенсивности $I = 0,10I_0$ (линия 4) разогрев резко уменьшается, и смесь перестаёт воспламеняться.

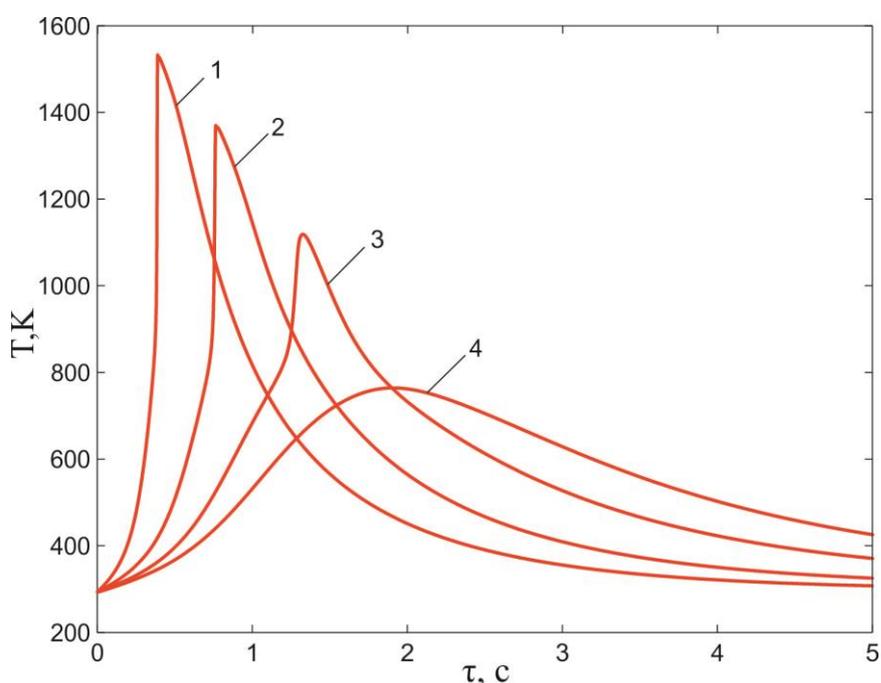


Рисунок 2.9 – Изменение температуры в смеси ($0,20\text{CH}_4 + 0,80\text{Cl}_2$)

при интенсивности УФ-излучения:

$$1 - I = I_0; 2 - I = 0,3 \cdot I_0; 3 - I = 0,15 \cdot I_0; 4 - I = 0,1 \cdot I_0$$

По аналогии с описанным в разделе 2.3 настоящей главы расчетом определили параметры изменения температуры от времени $T(\tau)$, полученные в смесях метана с хлором. По этим кривым устанавливали максимальную температуру разогрева смеси (T_{max}) и строили зависимость T_{max} от концентрации горючего в смеси (рисунок 2.10). На рисунке 2.10 приведены расчётные зависимости максимальной температуры разогрева смеси ($\text{CH}_4 + \text{Cl}_2$) от концентрации горючего при действии УФ-излучения различной интенсивности.

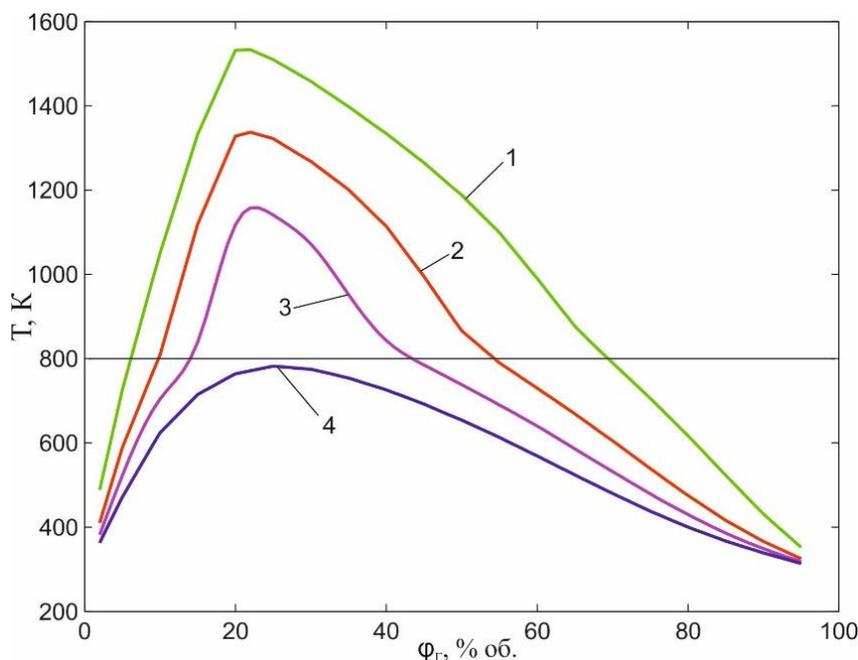


Рисунок 2.10 – Результат расчёта зависимости максимальной температуры разогрева смеси от начального содержания метана ϕ_r при различных интенсивностях УФ-излучения:
 1 – $I = I_0$; 2 – $I = 0,25 \cdot I_0$; 3 – $I = 0,15 \cdot I_0$; 4 – $I = 0,1 \cdot I_0$

В смесях метана с хлором максимальная расчётная температура разогрева смеси составила 1532 К, когда экспериментальная 1627 К. С уменьшением интенсивности УФ-излучения проявляется критичность пределов, это особенно хорошо заметно со стороны нижнего концентрационного предела (*линия 3*, рисунок 2.10). При интенсивности УФ-излучения $I = 0,10 I_0$ смеси метана с хлором не способны гореть.

Для определения концентрационной области воспламенения принимали минимальную температуру горения подобных смесей $T_r = 800$ К. На рисунке 2.11 приведены расчётные и экспериментальные результаты. Расчётная концентрационная область воспламенения составила 6–69 %(об.), а значение критической интенсивности УФ-излучения $I = 0,11 I_0$. Экспериментальные значения для концентрационной области воспламенения 7,5–62 %(об.), а критическая интенсивность УФ-излучения $I = 0,25 I_0$.

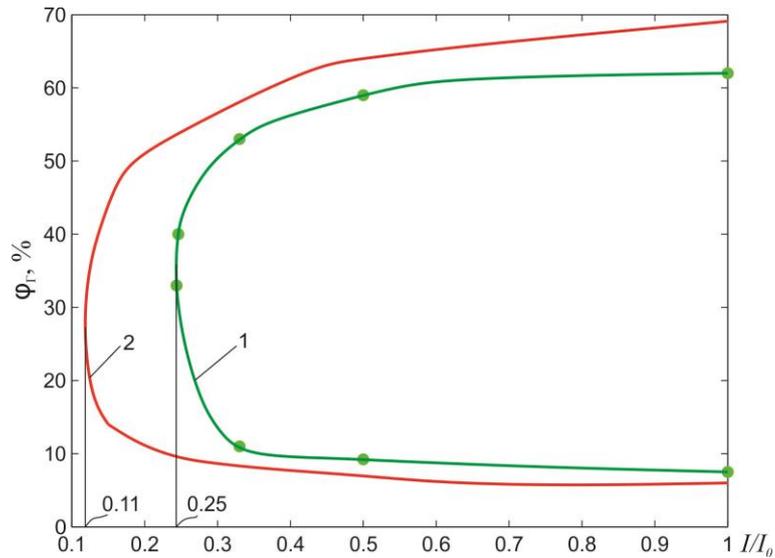


Рисунок 2.11 – Зависимость концентрационных пределов фототеплового воспламенения смеси $\text{CH}_4 + \text{Cl}_2$ от интенсивности УФ-излучения:

1 – экспериментальная; 2 – расчётная

Аналогичные расчёты были выполнены для смесей хлорметана, дихлорметана с хлором и сравнены с ранее выполненными экспериментальными работами [65–68]. Результаты приведены на рисунках 2.12–2.15 и таблицах 2.4, 2.5.

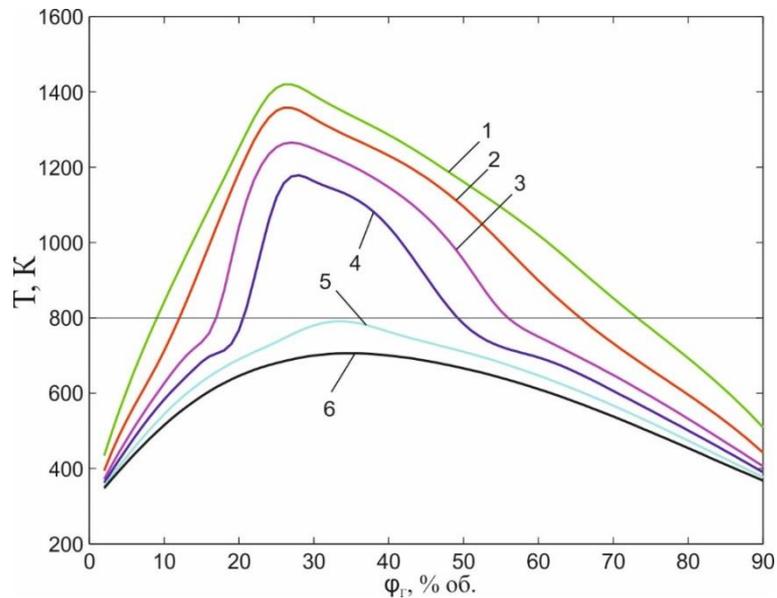


Рисунок 2.12 – Зависимость максимальной температуры разогрева смеси от начального содержания хлорметана φ_T при интенсивности УФ-излучения:

1 – $I = I_0$; 2 – $I = 0,131 \cdot I_0$; 3 – $I = 0,054 \cdot I_0$;

4 – $I = 0,036 \cdot I_0$; 5 – $I = 0,025 \cdot I_0$; 6 – $I = 0,019 \cdot I_0$

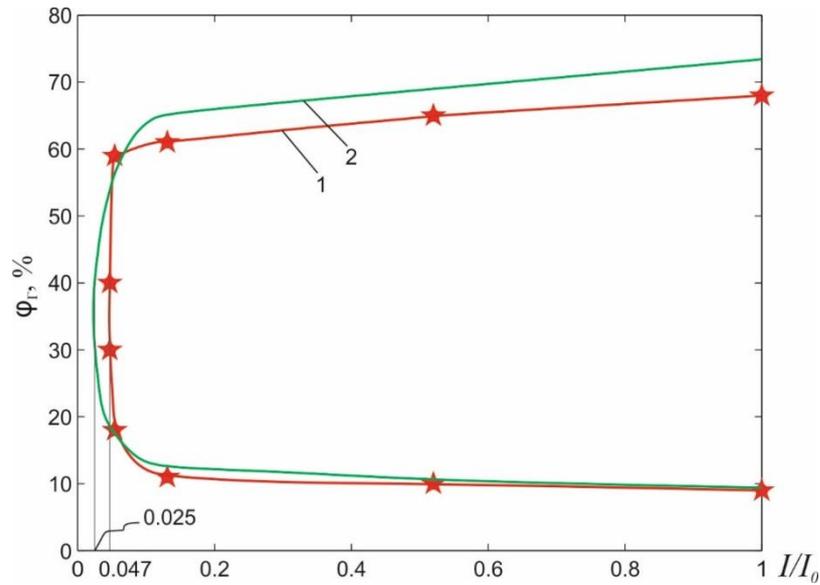


Рисунок 2.13 – Зависимость концентрационных пределов фототеплового воспламенения смеси $\text{CH}_3\text{Cl} + \text{Cl}_2$ от интенсивности УФ-излучения:

1 – экспериментальная; 2 – расчётная

Таблица 2.4 – Предельные параметры воспламенения смеси хлорметана с хлором

Параметры	Расчётные по модели	Экспериментальные при фотовоспламенении
Концентрационные пределы, % об.	9–73	9,0–68,0
Критическая интенсивность УФ-излучения, $I_{\text{кр}}$	$0,025 \cdot I_0$	$0,047 \cdot I_0$

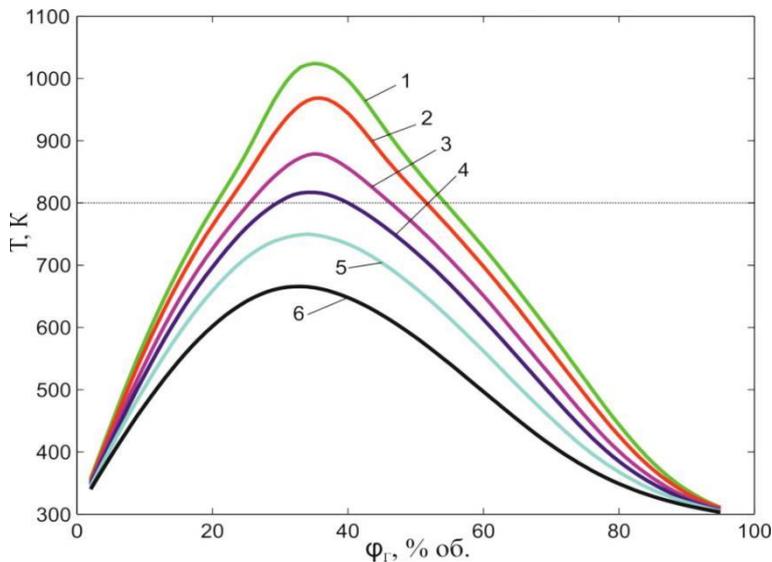


Рисунок 2.14 – Зависимость максимальной температуры разогрева смеси от начального содержания дихлорметана ϕ_r

при различных интенсивностях УФ-излучения:

УФ-излучения:

1 – $I = I_0$; 2 – $I = 0,75 \cdot I_0$; 3 – $I = 0,5 \cdot I_0$; 4 – $I = 0,37 \cdot I_0$;

5 – $I = 0,25 \cdot I_0$; 6 – $I = 0,15 \cdot I_0$

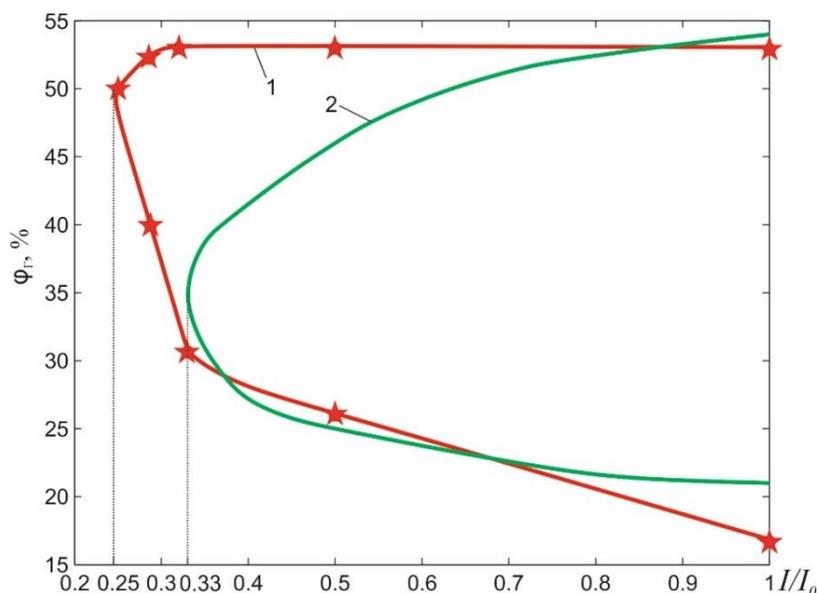


Рисунок 2.15 – Зависимость концентрационных пределов фототеплового воспламенения смеси $\text{CH}_2\text{Cl}_2 + \text{Cl}_2$ от интенсивности УФ-излучения:

1 – экспериментальная; 2 – расчётная

Таблица 2.5 – Предельные параметры воспламенения смеси дихлорметана с хлором

Параметры	Расчётные по модели	Экспериментальные при фотовоспламенении
Концентрационные пределы, %(об.)	21,0–54,0	17,0–53,0
Критическая интенсивность УФ-излучения, $I_{\text{кр}}$	$0,33 \cdot I_0$	$0,25 \cdot I_0$

Сравнение значений предельных параметров, приведенных для смесей метана, хлорметана и дихлорметана с хлором позволяет заключить, что расчётные результаты в целом находятся в удовлетворительном согласии с экспериментальными значениями. Наибольшее различие в значениях наблюдается для критической интенсивности УФ-излучения, что может быть связано с завышенным значением I_0 измеренной ранее фериксалатной актинометрией.

С помощью этой модели можно рассчитать количество флегматизатора (МФК), достаточное для предотвращения воспламенения реакционной смеси, и температуру самовоспламенения.

При исследовании фотовоспламенения смесей хлорметана и хлора экспериментально устанавливались значения МФК хлороформа и четырёххлористого углерода [69, 70]. Для этой же системы провели расчёты по модели и сравнили её

с ранее установленной экспериментальной зависимостью. Результаты представлены на рисунках 2.16 и 2.17 и в таблице 2.6.

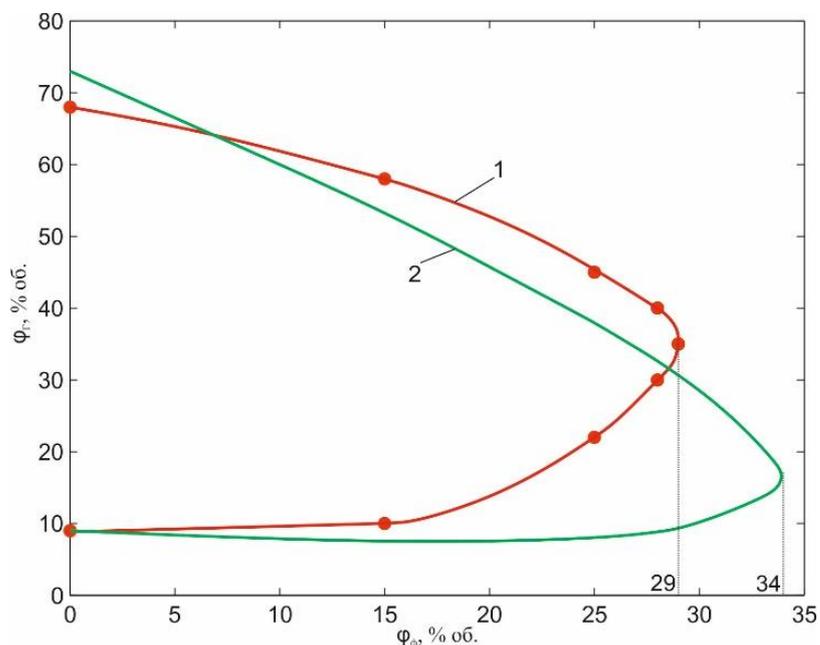


Рисунок 2.16 – Зависимость концентрационной области фотовоспламенения смеси $\text{CH}_3\text{Cl} + \text{Cl}_2$ от концентрации хлороформа (CHCl_3):
1 – экспериментальная; 2 – расчётная

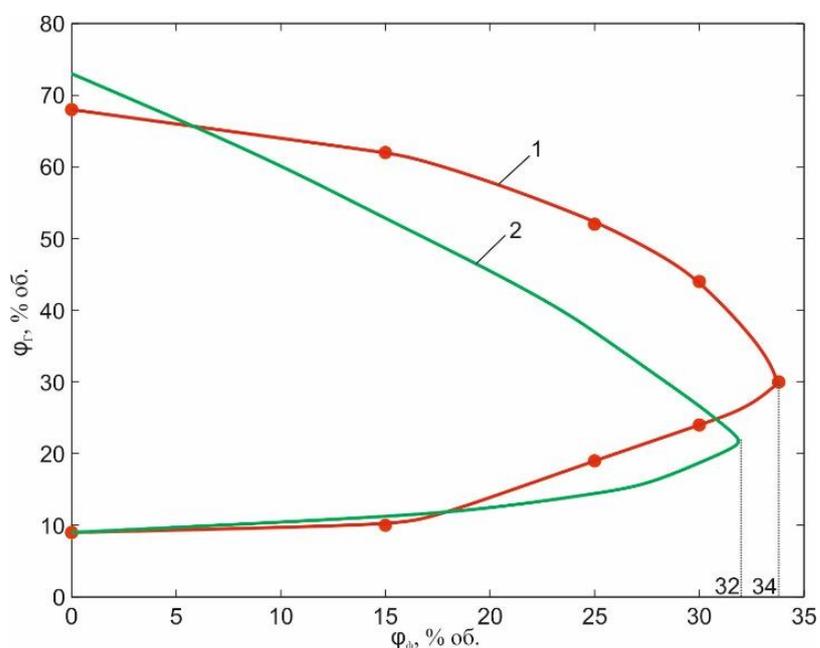


Рисунок 2.17 – Зависимость концентрационной области фотовоспламенения смеси $\text{CH}_3\text{Cl} + \text{Cl}_2$ от концентрации четырёххлористого углерода (CCl_4):
1 – экспериментальная; 2 – расчётная

Из рисунков 2.16 и 2.17 видно, что несмотря на небольшие различия в ходе зависимостей концентрационных пределов воспламенения от концентрации флегматизатора, значения МФК между собой достаточно хорошо согласуются.

Таблица 2.6 – Флегматизация смеси хлорметана с хлором

Параметры	Расчётные по модели	Экспериментальные при фотовоспламенении
МФК CHCl_3 , %(об.)	34	29
МФК CCl_4 , %(об.)	32	34

В работах [69, 70] было установлено, что трихлорметан имеет наименьшую МФК, чем четырёххлористый углерод. Это объясняется тем, что трихлорметан вступает в реакцию с атомами хлора и образует малоактивный трихлорметильный радикал. В расчётах же получилось, что, наоборот, значительно лучшей МФК обладает четырёххлористый углерод. При добавлении трихлорметана до 22 %(об.) в смесь $\text{CH}_3\text{Cl} + \text{Cl}_2$ наблюдалось увеличение области воспламенения со стороны нижнего концентрационного предела с 9 %(об.) до 7 %(об.).

Поскольку уравнение для скорости инициирования содержит и термическую составляющую, то с помощью модели можно описать чисто тепловое воспламенение и, следовательно, определить такой важный параметр как температура самовоспламенения.

На рисунке 2.18 представлены температурные поля, демонстрирующие процесс развития воспламенения смеси $0,20\text{CH}_4 + 0,80\text{Cl}_2$ при температуре стенок реакционного сосуда 613 К.

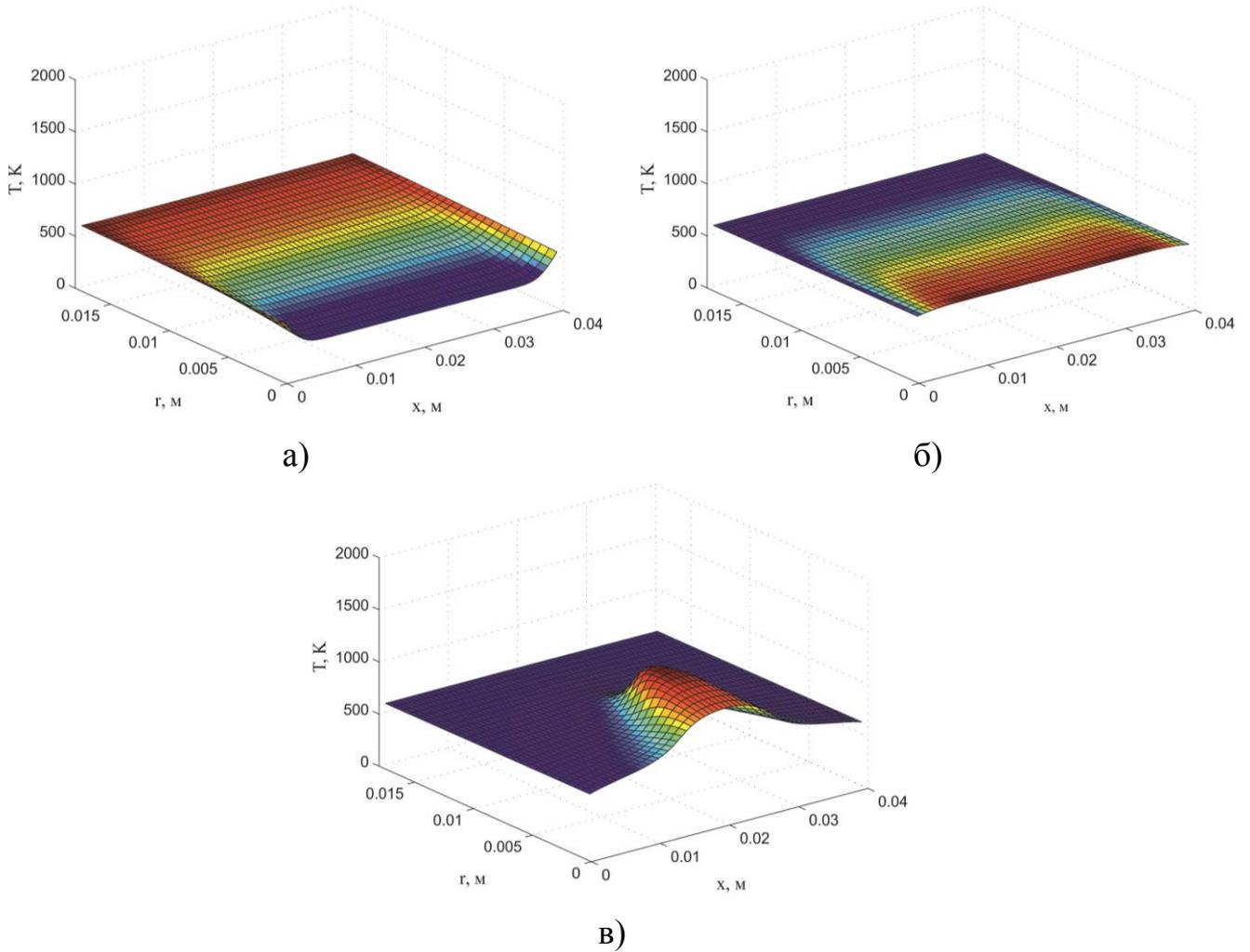


Рисунок 2.18 – Поля температур внутри реакционного сосуда при самовоспламенении смеси $0,20\text{CH}_4 + 0,80\text{Cl}_2$ на момент времени:

а) 0,628 с; б) 3,561 с; в) 6,494 с

В модели задавалась температура стенок реакционного сосуда. Температура смеси в сосуде составляет 293 К. Начинается прогрев смеси (рисунок 2.18 а) и с течением времени происходит воспламенение в центре реакционного сосуда (рисунок 2.18 в).

На рисунке 2.19 представлены расчётные температурные зависимости от времени смеси метана с хлором стехиометрического состава при температуре стенок реакционного сосуда 612 и 613 К [50]. В таблице 2.7 приведены экспериментальные и расчётные данные.

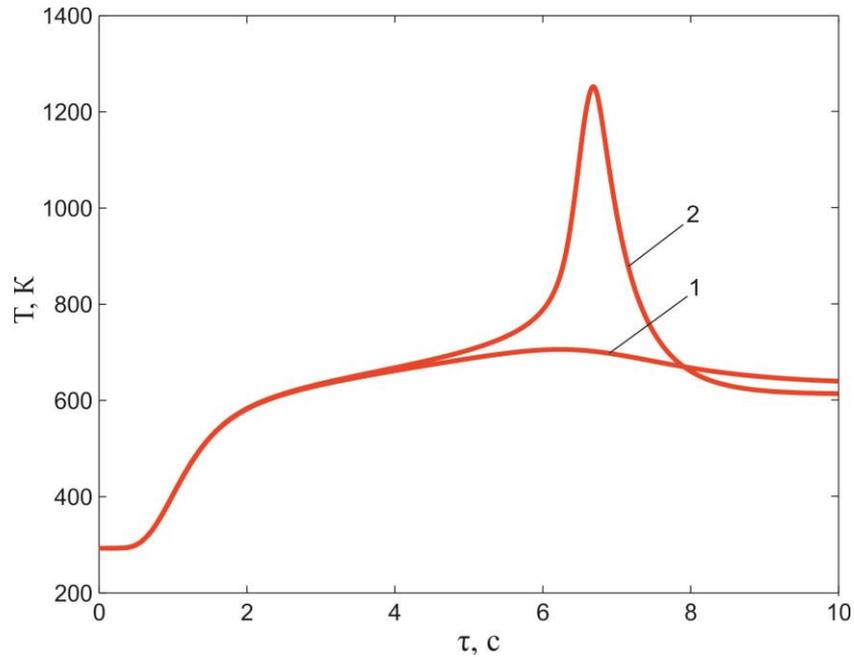


Рисунок 2.19 – Результаты расчёта изменения температуры смеси $0,20\text{CH}_4 + 0,80\text{Cl}_2$ при температуре стенок реакционного сосуда:
1 – 612 К; 2 – 613 К

Таблица 2.7 – Температура самовоспламенения смеси метана с хлором

Параметр	Расчёт по модели	Эксперимент [71]
$T_{\text{св}}$, К	613	591

При расчёте температуры самовоспламенения смеси метана с хлором наблюдается чёткая граница нижнего температурного предела. При температуре стенок сосуда 612 К происходит незначительное повышение температуры смеси (*линия 1*). При температуре стенок сосуда 613 К смесь воспламеняется (*линия 2*). Расчётные и экспериментальные значения хорошо согласуются.

Выводы

1. Разработана математическая модель фототеплового воспламенения, учитывающая химическую кинетику и термодинамику процесса, позволяющая определять показатели пожаровзрывоопасности газовой смеси;
2. Проведена апробация модели фототеплового воспламенения. Показана удовлетворительная сходимость расчётных и экспериментальных значений;
3. Если известен кинетический механизм реакции и физические параметры газовой смеси, то с достаточно хорошей точностью можно оценить её пожаровзрывоопасность.

ГЛАВА 3 ИССЛЕДОВАНИЯ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ СКОРОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ФРОНТА ПЛАМЕНИ В ГАЗОВОЗДУШНЫХ СМЕСЯХ

При расчёте СРФП необходимо знать один из важнейших показателей пожаровзрывоопасности – нормальную скорость горения ГВС. В самом начале взрывного горения облака ГВС фронт пламени движется со средней скоростью $u_n \cdot \varepsilon$. За счёт неустойчивости и искривления фронта пламени происходит его ускорение и переход горения из ламинарного режима в турбулентный. Для различных ГВС временной переход из ламинарного режима горения в турбулентный – разный и зависит от физико-химических свойств веществ. Также при расчётах параметров взрыва СРФП принимают постоянным значением. В действительности СРФП изменяется во времени.

В настоящей главе будет рассмотрена зависимость изменения СРФП с течением времени, на примере горения пропановоздушной смеси в протяжённой трубе. И получено выражение для определения СРФП с учётом физико-химических и газодинамических свойств горючих газовых смесей.

3.1 Определение параметров распространения пламени в пропановоздушной смеси

Серия экспериментов направлена на исследование ускорения и замедления пламени при взрывном горении газовой смеси.

В экспериментах использовалась пропановоздушная смесь стехиометрического состава (концентрация горючего 4,5 %(об.)). Взрывы производились в протяжённой камере длиной 4,12 м, имеющей квадратное сечение со стороной 0,16 м (рисунок 3.1).

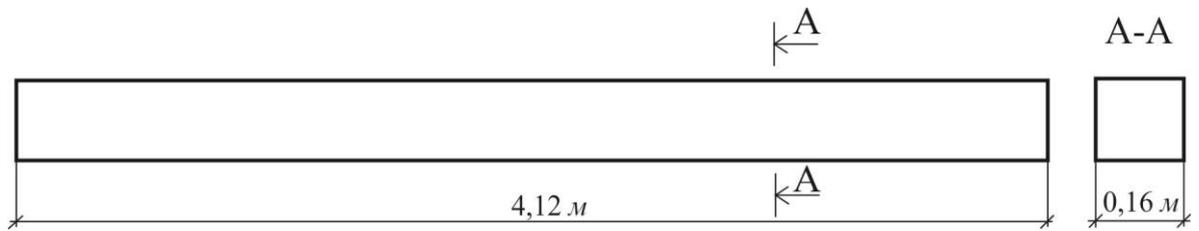


Рисунок 3.1 – Схематическое изображение экспериментальной камеры

Были выполнены две серии экспериментов. В 1-й серии камера разделена на три части с помощью выдвижных панелей, торцы камеры открыты. С помощью мерного шприца пропан закачивался в центральную камеру объёмом $V_{\text{ц}} = 0,0205 \text{ м}^3$, создавая смесь стехиометрического состава. После определённого времени, необходимого для выравнивания концентрации, осуществлялся поджог смеси. Зажигание смеси производилось с помощью электрической искры в разных точках (в центре – T1, на границе смеси – T2 и T3) (рисунок 3.2). В момент зажигания смеси выдвижные панели вынимались из камеры. В дальнейшем опыт при воспламенении смеси в точке T1 будем называть эксперимент I, в точке T2 – эксперимент II, а при воспламенении смеси в точке T3 будем называть эксперимент III.

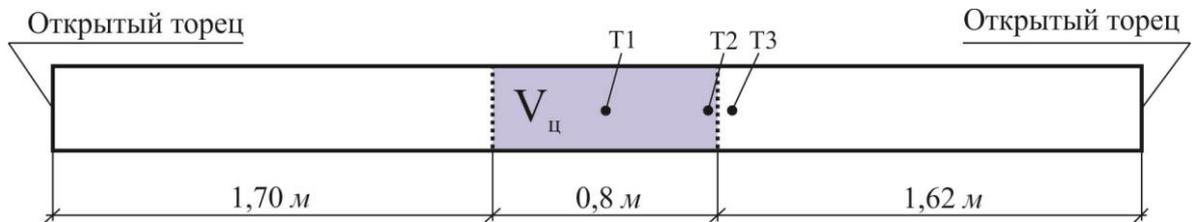


Рисунок 3.2 – Схема экспериментальной камеры, использованной при проведении 1-й серии экспериментов

Во 2-й серии экспериментов камера разделена на две части. Левый торец камеры открыт, а правый закрыт. Пропан закачивался в правую часть камеры. При проведении экспериментов использовались камеры двух объёмов: первая камера объёмом $V_{\text{к1}} = 0,00064 \text{ м}^3$, вторая – $V_{\text{к2}} = 0,0128 \text{ м}^3$. Зажигание смеси осуществлялось электрической искрой на границе газовой смеси в точке T4. В момент зажигания смеси панель, разделяющая камеру, вынималась (рисунок

3.3). В дальнейшем опыты при использовании камеры $V_{к1}$ будем называть эксперимент IV, а при использовании камеры $V_{к2}$ – эксперимент V.

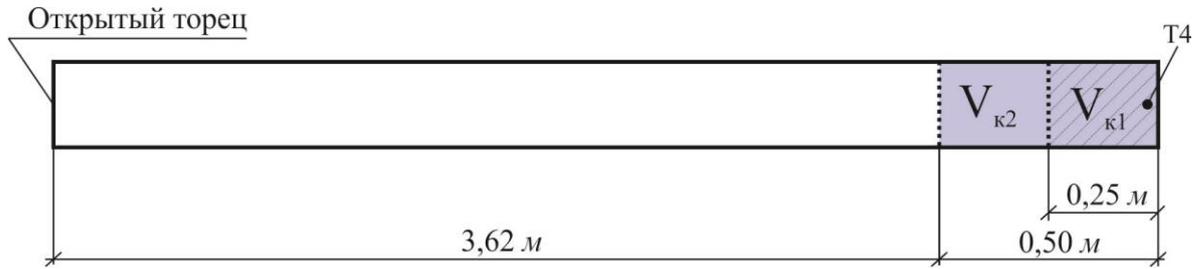


Рисунок 3.3 – Схема экспериментальной камеры, использовавшейся при 2-й серии экспериментов

Процесс распространения пламени фиксировался на скоростную камеру (240 кадров/с). Затем производилась раскадровка видео и с помощью математического аппарата строились зависимости изменения координаты фронта пламени от времени, изменения скорости распространения пламени от времени, изменения скорости распространения пламени от координаты.

3.2 Результаты экспериментальных исследований

На снимках (рисунок 3.4) представлен процесс распространения фронта пламени при зажигании смеси в центре облака – точке T1 в эксперименте I. После раскадровки видео были определены координаты фронта пламени для каждого момента времени. Расстояние, пройденное пламенем, измеряли от места зажигания, точки T1, до левого торца камеры.

На рисунке 3.5 показаны экспериментальные координаты положения фронта пламени для различных моментов времени. Для определения скоростных характеристик фронта пламени полученную зависимость дифференцировали. Прямое дифференцирование экспериментальных точек приводит к значительным погрешностям. Поэтому предварительно проводили интерполяцию полиномом 6-й степени, наиболее точно соответствующим экспериментальным значениям. И затем дифференцировали интерполяционную зависимость.

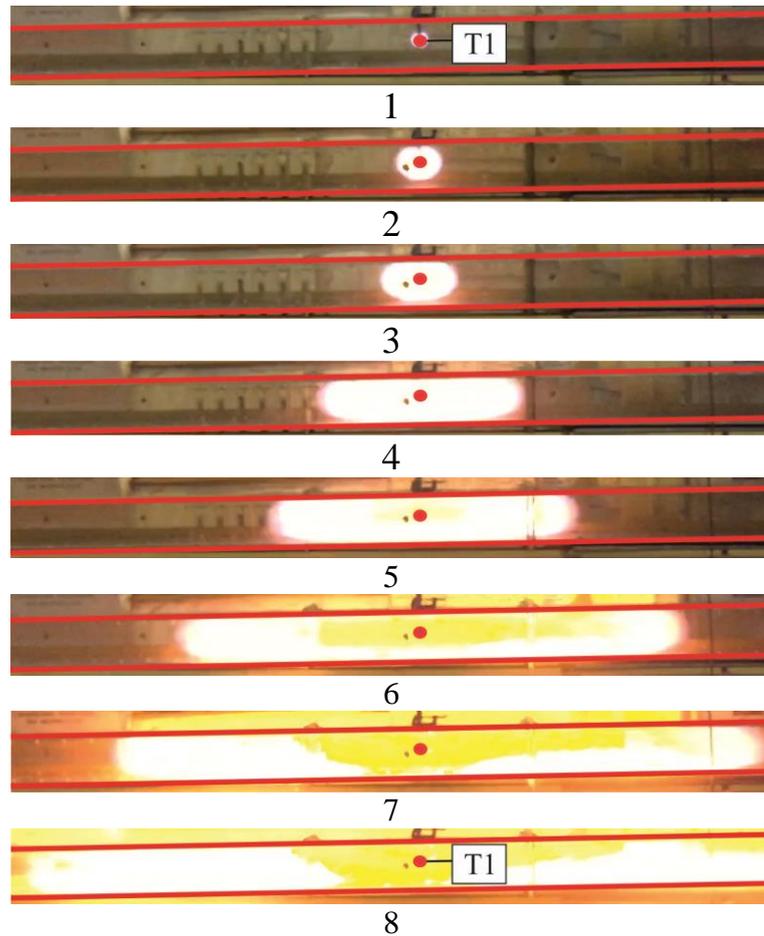


Рисунок 3.4 – Кадры процесса распространения пламени в эксперименте I:

1 – через 8,36 мс после воспламенения смеси; 2 – через 20,9 мс;

3 – через 29,26 мс; 4 – через 41,8 мс; 5 – через 54,34 мс;

6 – через 66,88 мс; 7 – через 75,24 мс; 8 – через 87,78 мс

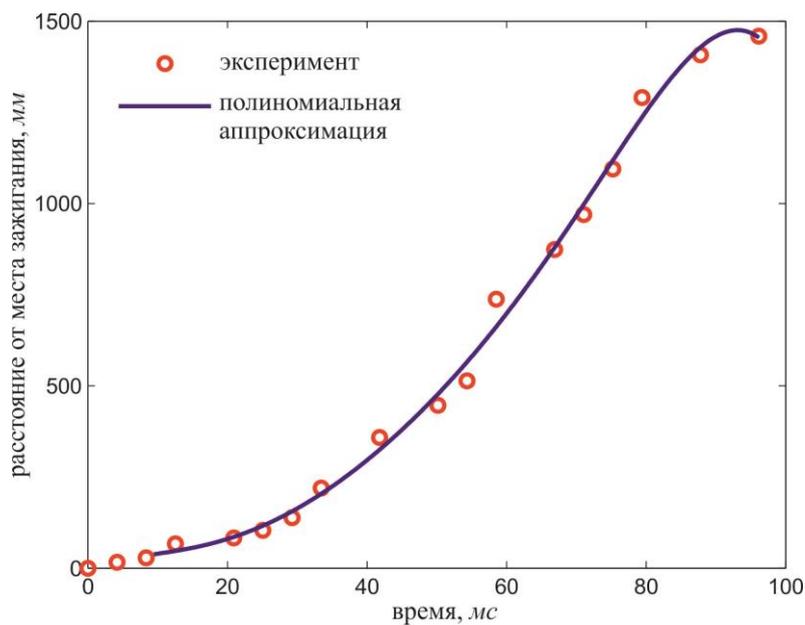


Рисунок 3.5 – Изменение координаты положения фронта пламени пропановоздушной смеси с течением времени. Эксперимент I

На рисунке 3.6 представлено изменение скорости фронта пламени от времени и от расстояния.

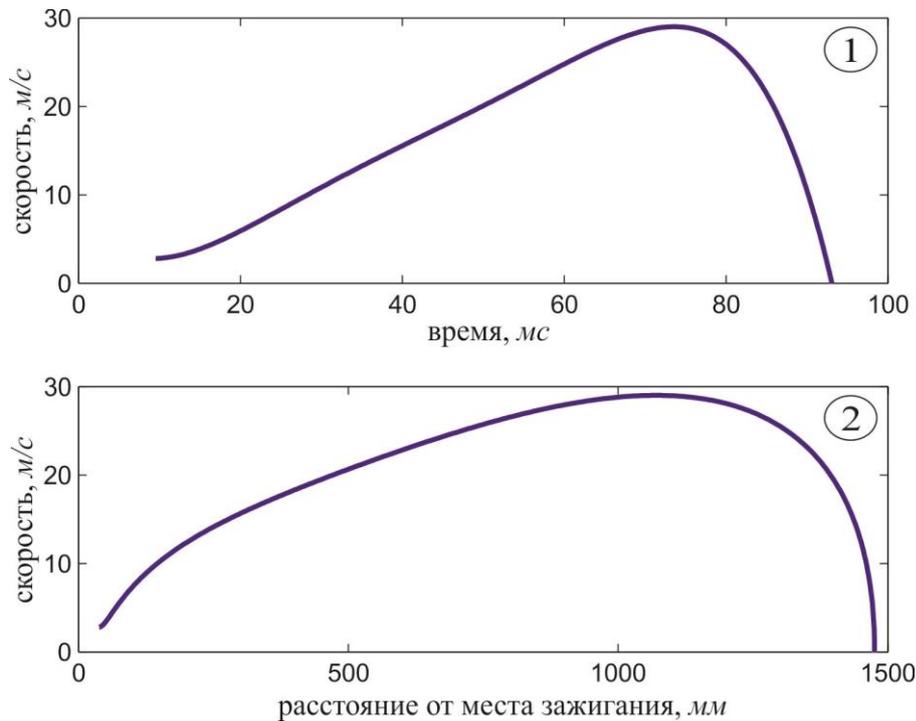


Рисунок 3.6 – Динамические параметры фронта пламени. Эксперимент I:

- 1 – зависимость скорости пламени от времени;
- 2 – зависимость скорости пламени от координаты

По результатам проведенного эксперимента I можно сделать следующие выводы. Учитывая, что степень расширения продуктов сгорания пропановоздушной смеси стехиометрического состава равна 8,06 раз, линейный размер облака продуктов сгорания должен быть равен $0,8 \cdot 8,06 \approx 6,4$ м, а от места зажигания смеси пламя должно распространиться на 3,2 м. Эксперимент показал, что горение прекратилось на расстоянии 1,5 м от места зажигания смеси, а максимальное значение скорости фронта пламени наблюдалось на расстоянии 1,0–1,2 м (см. рисунок 3.6), что в 3 раза меньше. Максимальная скорость при этом составила 25–30 м/с.

На рисунке 3.7 представлен процесс распространения фронта пламени в эксперименте II, когда воспламенение смеси происходило на границе газового облака, в точке T2.

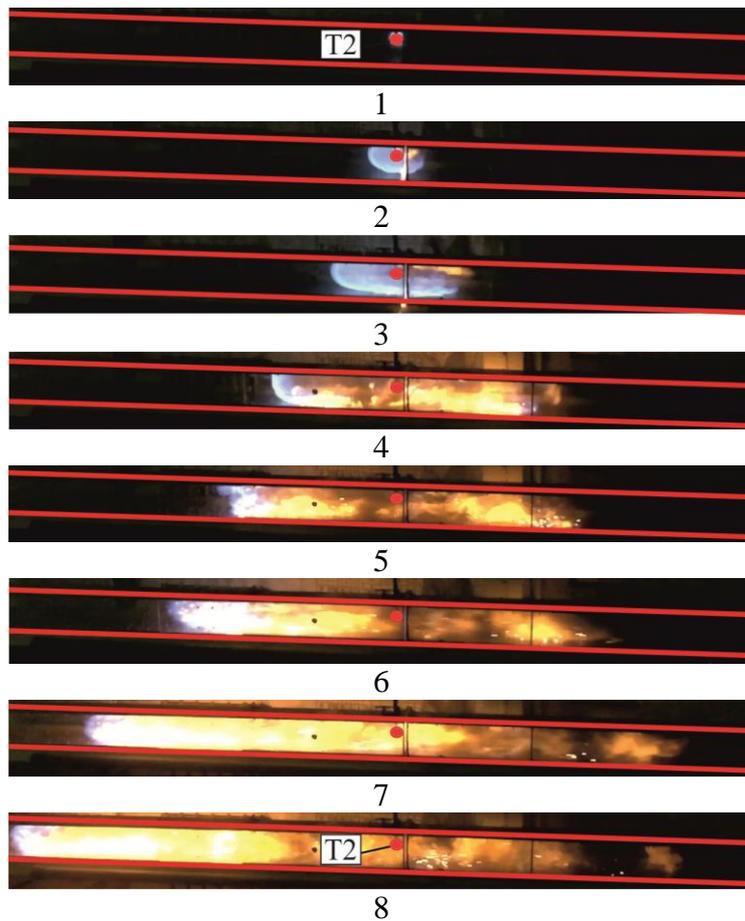


Рисунок 3.7 – Кадры процесса распространения пламени в эксперименте II:
 1 – через 4,18 мс после воспламенения смеси; 2 – через 33,44 мс; 3 – через 58,52 мс;
 4 – через 104,5 мс; 5 – через 146,3 мс; 6 – через 171,38 мс;
 7 – через 200,64 мс; 8 – через 238,26 мс

На рисунке 3.8 приведены экспериментальные координаты положения фронта пламени для различных моментов времени и интерполяционная зависимость, полином 6-й степени.

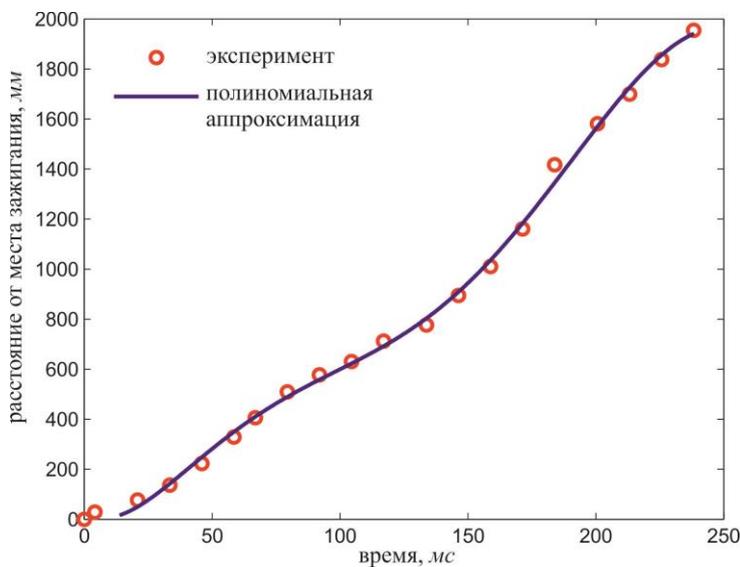


Рисунок 3.8 – Изменение координаты положения фронта пламени пропановоздушной смеси с течением времени. Эксперимент II.

На рисунке 3.9 показаны скоростные характеристики фронта пламени, полученные путём дифференцирования интерполяционной зависимости.

Из приведенных данных следует, что при воспламенении смеси на границе облака скорость распространения пламени как минимум в два раза меньше, чем при ее центральном воспламенении. В эксперименте I максимальная скорость фронта пламени достигла 25–30 м/с, а в эксперименте II максимальная скорость фронта пламени составила не более 12–14 м/с.

Таким образом, можно утверждать, что при воспламенении смеси на границе облака скорость фронта пламени примерно в два раза меньше, чем при ее центральном зажигании.

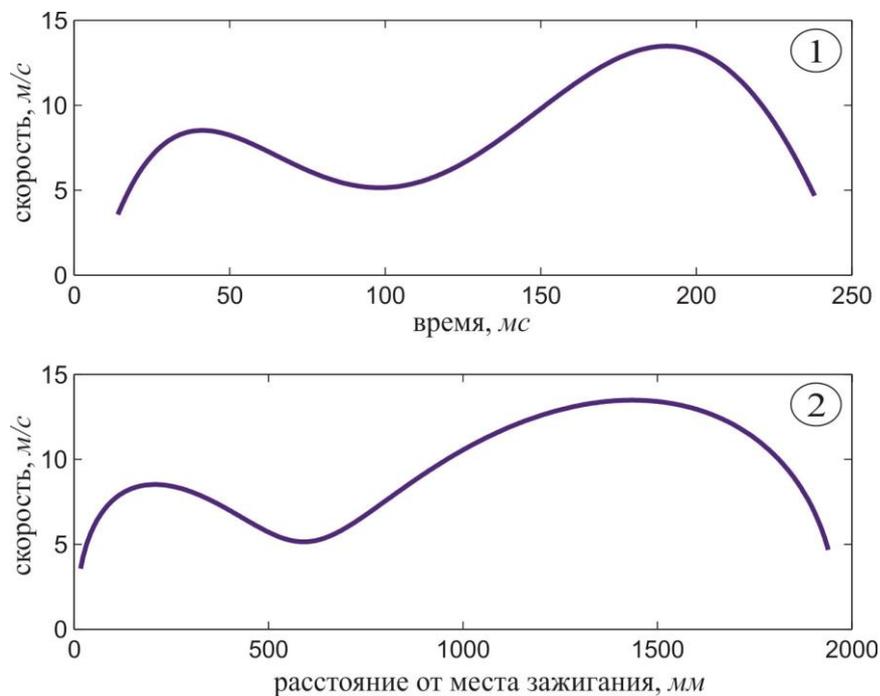


Рисунок 3.9 – Динамические параметры фронта пламени. Эксперимент II:

- 1 – зависимость скорости пламени от времени;
- 2 – зависимость скорости пламени от координаты

Рассмотрим результаты эксперимента III, когда источник расположен не во взрывоопасном газовом облаке, точка ТЗ (см. рисунок 3.2). Данный эксперимент в какой-то степени моделирует дрейф облака. В эксперименте газовое облако воспламенялось через некоторое время после удаления перегородок. Источник зажигания постоянно работал. После удаления перегородок газовое облако за счёт

диффузии перемещалось к источнику зажигания и воспламенялось. Рассмотренный сценарий взрывной аварии является типичным случаем. Отличие начальных условий эксперимента III от начальных условий эксперимента II заключается в том, что в эксперименте II происходит воспламенение пропановоздушной смеси стехиометрического состава, а в эксперименте III в результате диффузии газовой смеси в сторону источника зажигания (точка ТЗ) происходит воспламенение обедненной смеси.

На рисунке 3.10 представлен процесс распространения фронта пламени при проведении эксперимента III. Зажигание смеси осуществляется постоянно искрящим источником, находящимся в точке ТЗ, которая расположена вне облака.

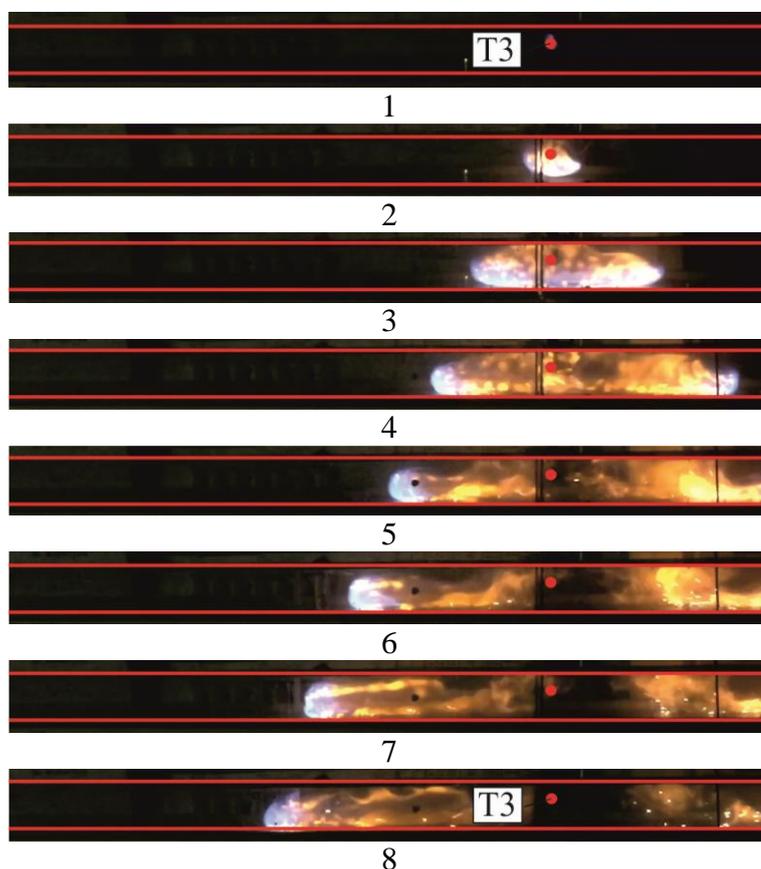


Рисунок 3.10 – Кадры процесса распространения пламени в эксперименте III:
 1 – момент воспламенения смеси; 2 – через 54,34 мс после воспламенения смеси;
 3 – через 96,14 мс; 4 – через 133,76 мс; 5 – через 175,56 мс;
 6 – через 213,18 мс; 7 – через 254,98 мс; 8 – через 292,60 мс

На рисунке 3.11 приведены координаты положения фронта пламени с течением времени и полиномиальная зависимость 8-й степени, которая наиболее точно описывает экспериментальные значения.

На рисунке 3.12 показаны скоростные характеристики фронта пламени, полученные дифференцированием полиномиальной зависимости, описывающей положение фронта пламени во времени. Из приведённых данных видно, что максимальная скорость фронта пламени не превышает 5 м/с.

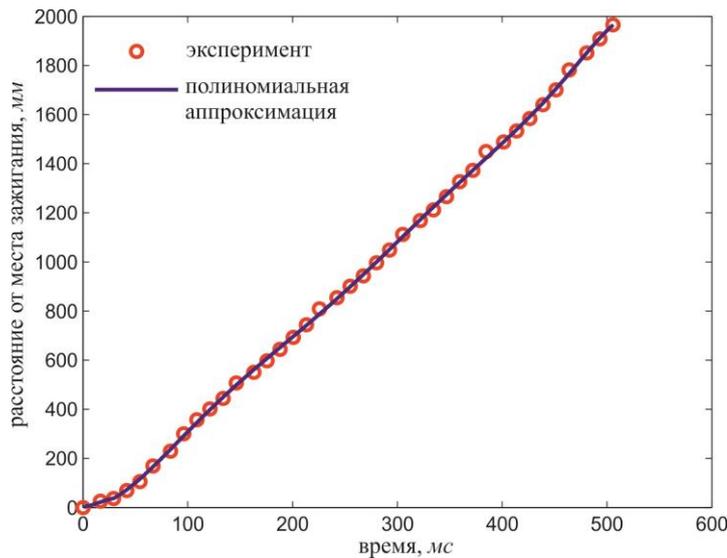


Рисунок 3.11 – Изменение координаты положения фронта пламени пропановоздушной смеси с течением времени. Эксперимент III

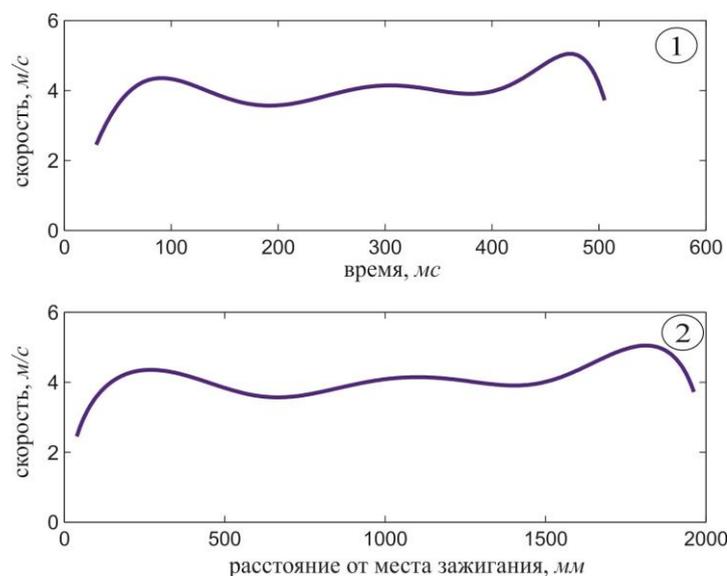


Рисунок 3.12 – Динамические параметры фронта пламени. Эксперимент III:

- 1 – зависимость скорости пламени от времени;
- 2 – зависимость скорости пламени от координаты

Таким образом, можно предположить, что дрейф газового облака и воспламенение на его границе приводит к дефлаграционному взрыву, при котором скорость распространения пламени не ускоряется. А скорость распространения пламени приблизительно равняется $U_n \varepsilon = 0,45 \cdot 8,06 \approx 3,63$ м/с. В этом случае можно говорить об огневом шторме, который сопровождается только скоротечными тепловыми нагрузками.

Рассмотрим вторую серию экспериментов. На рисунке 3.13 представлен процесс распространения пламени, когда взрывоопасная газовая смесь находилась в правой части камеры, а левый торец трубы открыт. Зажигание смеси осуществлялось в точке Т4. В эксперименте IV объём газовой смеси (объём камеры) составлял $V_{к1} = 0,00064$ м³, а линейная протяженность 0,25 м. Соответственно при полном сгорании смеси линейный размер продуктов взрыва должен равняться $R_{пл} = 0,25 \cdot 8,06 \approx 2$ м.

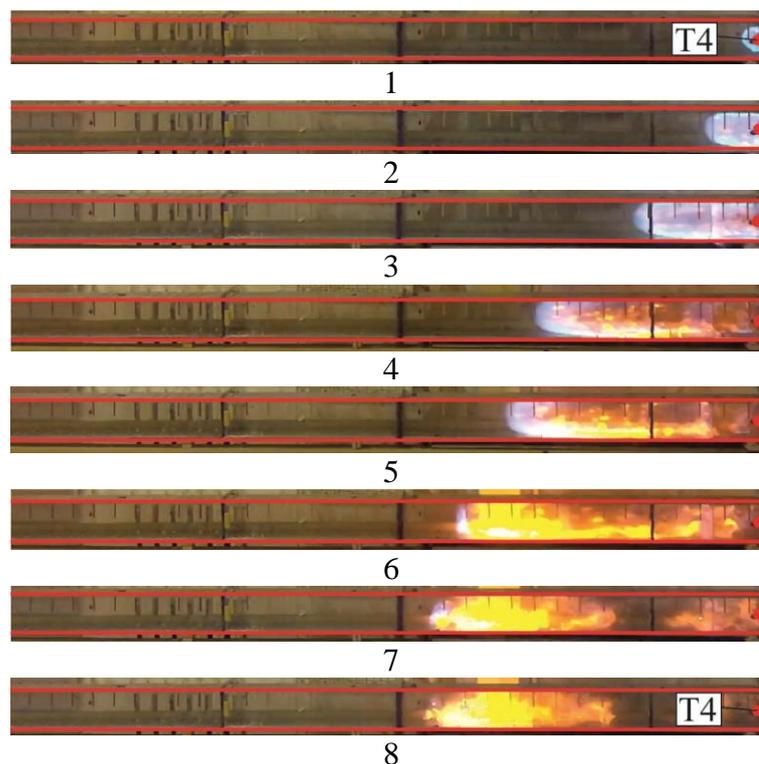


Рисунок 3.13 – Кадры процесса распространения пламени в эксперименте IV:

- 1 – момент воспламенения смеси; 2 – через 37,62 мс после воспламенения смеси; 3 – через 58,52 мс; 4 – через 79,42 мс; 5 – через 91,96 мс; 6 – через 112,86 мс; 7 – через 133,76 мс; 8 – через 154,66 мс

На рисунке 3.14 показаны координаты положения фронта пламени на различные моменты времени и интерполяционная зависимость, представляющая собой полином 6-й степени.

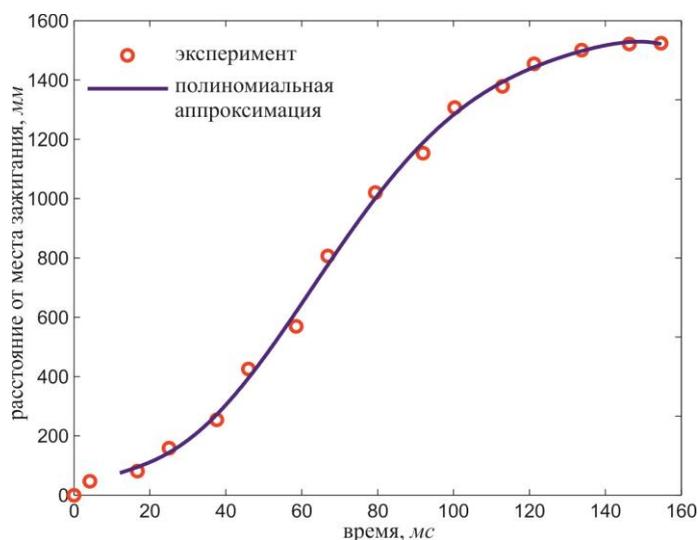


Рисунок 3.14 – Изменение координаты положения фронта пламени пропановоздушной смеси с течением времени.
Эксперимент IV.

На рисунке 3.15 приведены скоростные характеристики фронта пламени, полученные из интерполяционного соотношения, описывающего положение фронта пламени в зависимости от времени.

Из анализа рисунка 3.15 можно сделать следующие выводы. Скорость пламени достигла максимального значения 20 м/с, когда фронт пламени прошел треть необходимого пути $R_{ПД}/3$. Окончание процесса горения происходит на $3/4 \cdot R_{ПД}$, т.е. 1/4 часть смеси не сгорает, так как за счёт диффузии она обедняется до состояния, когда горение не возможно. Процесс прекращения горения происходит плавно.

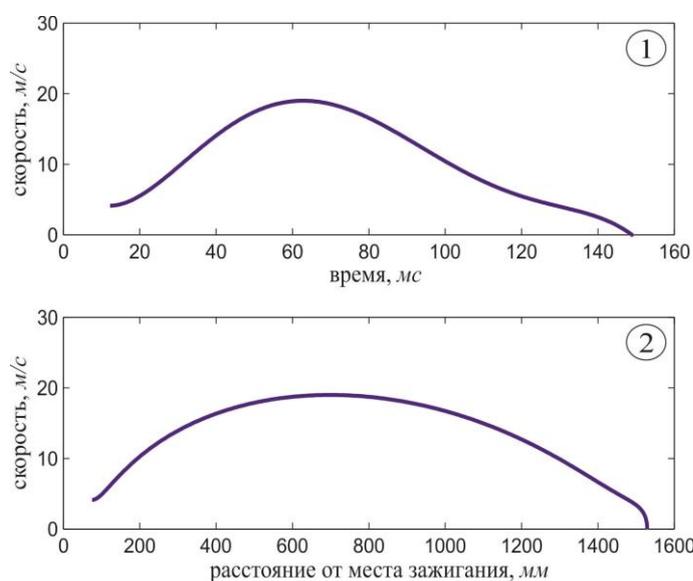


Рисунок 3.15 – Динамические параметры фронта пламени.

Эксперимент IV:

- 1 – зависимость скорости пламени от времени;
- 2 – зависимость скорости пламени от координаты

Для подтверждения и уточнения выводов, сделанных на основании эксперимента IV, был проведён эксперимент V, в котором камера была увеличена в два раза. Объём камеры составлял $V_{к2} = 0,0128 \text{ м}^3$, а его линейная протяженность была равна 0,5 м. То есть при полном сгорании смеси линейный размер продуктов сгорания должен составлять $L_{ОШ} = 0,5 \cdot 8,06 \approx 4 \text{ м}$.

На рисунке 3.16 представлен процесс распространения фронта пламени при проведении эксперимента V.

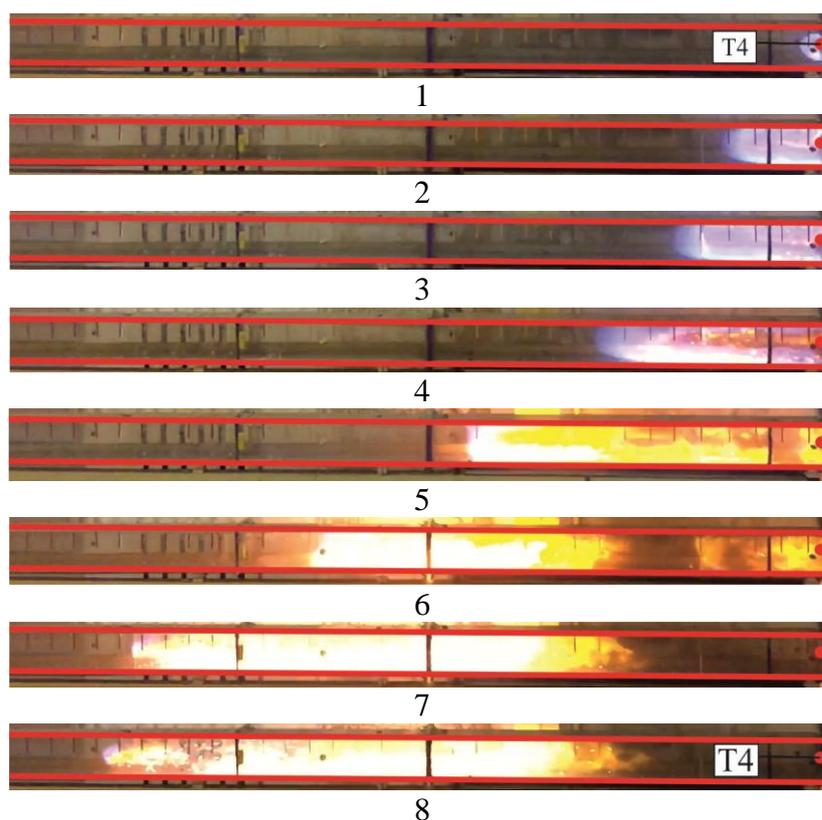


Рисунок 3.16 – Кадры процесса распространения пламени в эксперименте V:

1 – момент воспламенения смеси; 2 – 37,62 мс после воспламенения смеси;
3 – через 45,98 мс; 4 – через 58,52 мс; 5 – через 83,6 мс; 6 – через 129,58 мс;
7 – через 200,64 мс; 8 – через 238,26 мс.

На рисунке 3.17 приведены экспериментальные координаты положения фронта пламени на различные моменты времени и интерполяционная зависимость, представляющая собой полином 8-й степени.

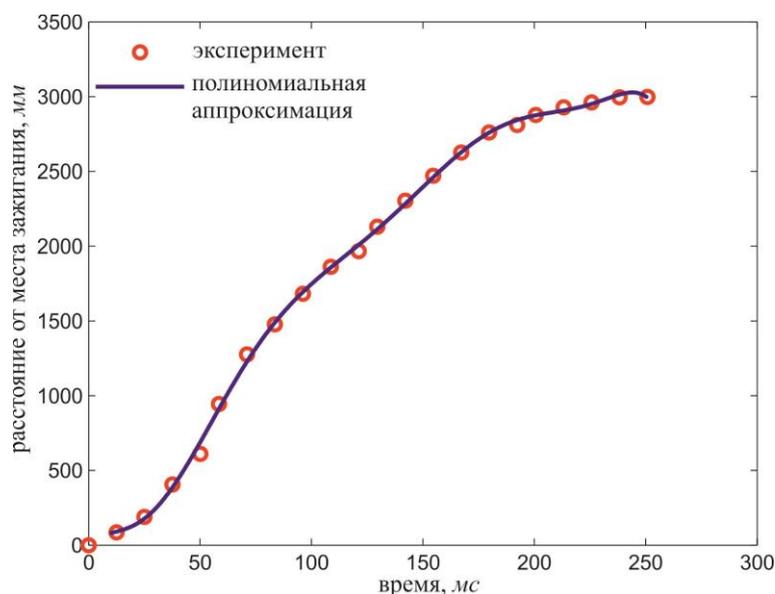


Рисунок 3.17 – Изменение координаты положения фронта пламени пропановоздушной смеси с течением времени. Эксперимент V

На рисунке 3.18 приведены скоростные характеристики фронта пламени, полученные из интерполяционной зависимости, описывающей положение фронта пламени в зависимости от времени.

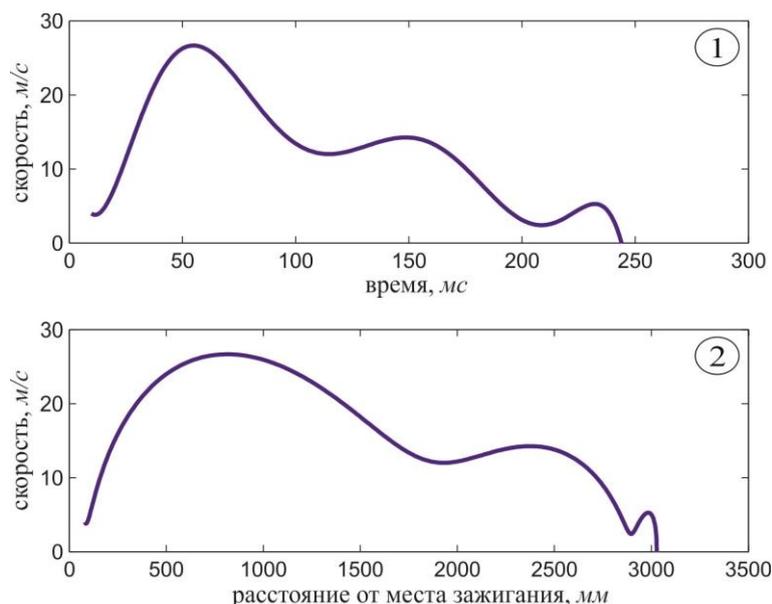


Рисунок 3.18 – Динамические параметры фронта пламени. Эксперимент V:

- 1 – зависимость скорости пламени от времени;
- 2 – зависимость скорости пламени от координаты

Приведённые на рисунке 3.18 результаты подтверждают сделанные ранее выводы по эксперименту IV. Скорость пламени достигла максимального значения около 25 м/с на расстоянии $R_{ПД}/4$, т.е. когда фронт пламени «прошёл» четверть необходимого пути. Горение прекратилось на расстоянии $3/4 R_{ПД}$. Процесс прекращения горения происходит плавно и занимает около 0,5 м, что соответствует $1/8 R_{ПД}$.

Из второй серии экспериментов можно сделать следующие выводы. При стехиометрической концентрации пропановоздушной смеси пламя движется с ускорением, разгон пламени реализуется на расстоянии $0,3 R_{\text{ПЛ}}$. Затем на протяжении $0,55 R_{\text{ПЛ}}$ пламя движется с постоянной скоростью, и на расстоянии $0,15 R_{\text{ПЛ}}$ горение прекращается. При этом реальный размер продуктов взрыва составляет не более $0,75 R_{06} \epsilon$, где R_{06} – радиус облака смеси.

3.3 Теоретический расчёт скорости распространения фронта фронта пламени в газовых смесях

Определение видимой скорости пламени будем производить по аналогии с работой [72], когда вначале рассматривается процесс распространения пламени по газовой смеси без учёта влияния внешних факторов и только потом учитывается влияние внешних факторов.

На рисунке 3.19 показаны режимы распространения пламени в газе, вследствие которых возможен переход от ламинарного горения к детонационному.

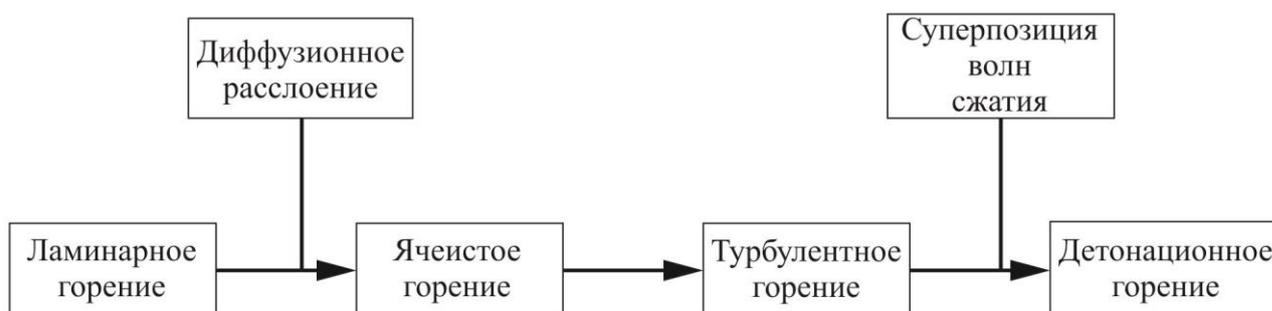


Рисунок 3.19 – Режимы распространения пламени

При ламинарном горении распространение пламени происходит по упорядоченным слоям газовой смеси, т.е. тепло передается от слоя к слою. При турбулентном горении нарушается упорядоченная слоистая структура газовой смеси, происходит интенсивное перемешивание слоев, и тепло уже передается в результате перемещения небольших объемов среды.

Поэтому необходимо найти зависимость перехода ламинарного горения в турбулентный и определить, с какой скоростью будет распространяться пламя.

Для решения поставленной задачи было принято, что распространение пламени в газовой смеси подобно течению жидкости в гладких круглых трубах, т.е. движение газа подчиняется законам гидродинамики. И коэффициент температуропроводности в газовой смеси пропорционален коэффициенту гидравлического трения.

Переход из ламинарного потока в турбулентный поток описывается безразмерным числом Рейнольдса:

$$Re = \frac{\vartheta L}{\nu} \quad (3.1)$$

где ϑ – скорость потока;

L – характерный размер рассматриваемой системы;

ν – кинематическая вязкость среды.

Так как скорость распространения пламени при ламинарном режиме постоянна, то анализируя формулу (3.1) можно прийти к выводу, что распространение пламени может перейти из ламинарного горения в турбулентное только при определённом размере газового облака. Расстояние, через которое ламинарное горение переходит в турбулентное, будем называть критическим радиусом газового облака и обозначать его $R_{кр}$.

В какой-то момент времени при переходе из ламинарного горения в турбулентное числа Рейнольдса равны и если взять отношения (3.2), приведённые ниже, то турбулентный режим будет возможен, только если соотношение больше единицы.

$$\frac{\alpha_T}{\alpha_L} \sim \frac{\lambda_T}{\lambda_L} > 1; \quad \frac{R_p}{R_{кр}} \sim \frac{Re_T}{Re_L} > 1, \quad (3.2)$$

где α_T – турбулентный коэффициент температуропроводности;

α_L – ламинарный коэффициент температуропроводности;

λ_T – турбулентный коэффициент гидравлического трения;

λ_L – ламинарный коэффициент гидравлического трения;

R_p – длина пути разгона пламени от места воспламенения;

Re_T – число Рейнольдса при турбулентном режиме;

$Re_{\text{л}}$ – число Рейнольдса при ламинарном режиме.

Для гладких труб гидравлический коэффициент трения при ламинарном режиме равняется $\lambda_{\text{л}} = \frac{64}{Re}$, а для турбулентного $\lambda_{\text{т}} = \frac{0,3164}{Re^{1/4}}$ [73].

То есть отношение $\lambda_{\text{т}} / \lambda_{\text{л}}$ пропорционально изменению числу Рейнольдса как

$$\frac{\lambda_{\text{т}}}{\lambda_{\text{л}}} \sim \left(\frac{Re_{\text{т}}}{Re_{\text{л}}} \right)^{3/4}. \quad (3.3)$$

Из приведенных соображений можно определить турбулентный коэффициент температуропроводности:

$$\alpha_{\text{т}} = \alpha_{\text{л}} \cdot \left(\frac{R_{\text{п}}}{R_{\text{кр}}} \right)^{\frac{3}{4}}. \quad (3.4)$$

Скорость распространения пламени определяется коэффициентом температуропроводности [74] и описывается формулой:

$$\vartheta = \sqrt{\frac{\alpha}{\tau}}, \quad (3.5)$$

где α – коэффициент температуропроводности;

$\tau = 1/k$ – характерное время реакции;

k – константа скорости химической реакции.

Подставляя (3.4) в (3.5) получим выражение скорости распространения пламени в турбулентном режиме [75]:

$$\vartheta = \sqrt{\frac{\alpha_{\text{т}}}{\tau}} = \sqrt{\frac{\alpha_{\text{л}}}{\tau} \cdot \left(\frac{R_{\text{п}}}{R_{\text{кр}}} \right)^{3/4}} = \sqrt{\frac{\alpha_{\text{л}}}{\tau}} \cdot \left(\frac{R_{\text{п}}}{R_{\text{кр}}} \right)^{\frac{3}{8}} = \vartheta_{\text{н}} \cdot \varepsilon \cdot \left(\frac{R_{\text{п}}}{R_{\text{кр}}} \right)^{\frac{3}{8}}, \quad (3.6)$$

где ε – степень расширения продуктов сгорания;

$\vartheta_{\text{н}}$ – нормальная скорость распространения пламени.

Чтобы определить скорость распространения пламени при турбулентном режиме по формуле (3.6) необходимо определить $R_{\text{кр}}$. Для этого необходимо определить число Рейнольдса при ламинарном и турбулентном потоках.

При ламинарном режиме число Рейнольдса будет равно:

$$Re = \frac{\vartheta_{\text{мин}} \cdot R_{\text{кр}}}{\nu_0}, \quad (3.7)$$

где ϑ_{\min} – видимая скорость распространения пламени ($\vartheta_{\min} = \vartheta_n \cdot \varepsilon$);

ν_0 – кинематическая вязкость газовой среды.

Число Рейнольдса для турбулентного режима распространения пламени определить очень трудно, так как в данном режиме отсутствует постоянство процесса. В связи с этим определять число Рейнольдса будем для детонационного горения. Детонационное горение газовых смесей хорошо изучено и для него получено много экспериментальных данных [76–83]. Для этого вида горения:

$$Re = \frac{\vartheta_d \cdot \Delta}{\nu_d}, \quad (3.8)$$

где ϑ_d – скорость движения продуктов детонации на фронте детонационной волны;

Δ – размер (ширина) детонационной ячейки [84–88];

ν_d – кинематическая вязкость газовой среды детонации.

Кинематическая вязкость газовой среды в значительной мере зависит от давления и пропорциональна $\sim (P)^{3/2}$. То есть

$$\nu_d = \nu_0 \cdot \left(\frac{P_{\text{изб}}^{\phi}}{P_0} \right)^{3/2}, \quad (3.9)$$

где $P_{\text{изб}}^{\phi}$ – избыточное давление на фронте детонационной волны;

P_0 – атмосферное давление.

Если принять, что в какой-то момент времени выражение (3.7) равно выражению (3.8), с учётом выражения (3.9) можно определить критический радиус газового облака $R_{\text{кр}}$:

$$R_{\text{кр}} = \frac{\vartheta_d \cdot \Delta}{\vartheta_{\text{пл}} \cdot \left(\frac{P_{\text{изб}}^{\phi}}{P_0} \right)^{3/2}}. \quad (3.10)$$

Такой подход в определении СРФП в турбулентном режиме заключается в следующем. Нами определены параметры горения в ламинарном и детонационном режимах. Турбулентный режим согласно рисунку 3.19 лежит между этими режимами. Учитываем, что согласно работам [89, 90] газовая смесь может перейти в детонацию только если имеется газовое облако достаточного размера. То есть

мы находим промежуточное значение СРФП в турбулентном режиме между ламинарным и детонационным горением в зависимости от размера газового облака.

3.4 Сравнение усовершенствованной методики определения скорости распространения фронта пламени с существующими

Определим видимую скорость распространения пламени пропановоздушной смеси по методике [12].

Исходные данные для расчёта:

- масса горючей компоненты смеси – 10000 кг;
- доля участия горючего во взрыве – 10 %;
- массовая концентрация горючего в стехиометрической смеси – 72,0 г/м³;
- нормальная скорость горения $\vartheta_n = 0,45$ м/с;
- степень расширения продуктов сгорания $\varepsilon = 8,06$;
- высота стелящегося взрывоопасного облака $H_{об} = 7$ м;
- температура окружающей среды $T_0 = 300$ К.

Определяем радиус облака образующейся смеси:

$$R_{об} = 0,782 \cdot \sqrt[3]{M \cdot Z \cdot \frac{1000}{C_m}}, \quad (3.11)$$

где M – масса горючей компоненты в смеси, кг;

Z – доля горючего, участвующая при взрыве;

C_m – массовая концентрация горючего в стехиометрической смеси, г/м³.

$$R_{об} = 0,782 \cdot \sqrt[3]{10000 \cdot 0,1 \cdot \frac{1000}{72,0}} = 18,7 \text{ м.}$$

Определяем радиус разгона пламени в облаке:

$$R_p = 0,75 \cdot H_{об} \cdot \sqrt[3]{\varepsilon} = 0,75 \cdot 7 \cdot \sqrt[3]{8,06} = 10,5 \text{ м} \quad (3.12)$$

и значение скорости пламени $\vartheta_{нв}$, невозмущённой влиянием внешних факторов:

$$\vartheta_{нв} = \vartheta_{\min} \cdot \left(1 + A \cdot \sqrt{\frac{R_p}{\Delta}} \right), \quad (3.13)$$

где A – функция от W_{\min} (для пропана $A = 0,34$);

W_{\min} – минимальная скорость распространения пламени ($W_{\min} = \vartheta_{\text{н}} \varepsilon$).

$$\vartheta_{\text{нв}} = 3,67 \cdot \left(1 + 0,34 \cdot \sqrt{\frac{10,5}{0,069}}\right) = 19,1 \text{ м/с.}$$

Для этих же исходных данных посчитаем видимую скорость распространения пламени невозмущённой среды по методике, описанной в главе 3.3.

Определяем скорость распространения фронта детонационной волны $D_{\text{д}}$:

$$D_{\text{д}} = \sqrt{2000 \cdot (k_{\text{д}}^2 - 1) \cdot q_m}, \text{ м/с,} \quad (3.14)$$

где $k_{\text{д}}$ – показатель адиабаты в продуктах взрыва (для C_3H_8 $k_{\text{д}} = 1,286$);

q_m – удельная энергия взрыва стехиометрической смеси, кДж/кг (для C_3H_8 $q_m = 2797$ кДж/кг).

$$D_{\text{д}} = \sqrt{2000 \cdot (1,286^2 - 1) \cdot 2797} = 1912, \text{ м/с.}$$

Рассчитываем скорость движения продуктов детонации на фронте детонационной волны:

$$\vartheta_{\text{д}} = \frac{D_{\text{д}}}{k_{\text{д}} + 1}, \text{ м/с,} \quad (3.15)$$

$$\vartheta_{\text{д}} = \frac{1912}{1,286 + 1} = 836 \text{ м/с.} \quad (3.16)$$

Определяем избыточное давление на фронте детонационной волны:

$$P_{\text{изб}}^{\Phi} = \frac{\rho_{\text{см}} \cdot D_{\text{д}}^2}{k_{\text{д}} + 1} \cdot 10^{-3}, \quad (3.17)$$

где $\rho_{\text{см}}$ – плотность пропановоздушной смеси стехиометрического состава.

$$P_{\text{изб}}^{\Phi} = \frac{1,246 \cdot 1912^2}{1,286 + 1} \cdot 10^{-3} = 1992 \text{ кПа.} \quad (3.18)$$

Далее по формуле (3.10) находим критический радиус газового облака $R_{\text{кр}}$:

$$R_{\text{кр}} = \frac{836 \cdot 0,069}{0,45 \cdot 8,06 \cdot \left(\frac{1992}{101}\right)^{3/2}} = 0,181 \text{ м.} \quad (3.19)$$

Для пропана ширина детонационной ячейки составляет $\Delta = 0,069$ м.

Определив критический радиус газового облака можно найти видимую скорость распространения пламени по формуле (3.6):

$$\vartheta_{\text{нв}} = \vartheta_{\text{н}} \cdot \varepsilon \cdot \left(\frac{R_{\text{п}}}{R_{\text{кр}}}\right)^{\frac{3}{8}} = 0,45 \cdot 8,06 \cdot \left(\frac{10,5}{0,181}\right)^{\frac{3}{8}} = 16,6 \text{ м/с.} \quad (3.20)$$

Определим видимую скорость распространения пламени для водородовоздушной смеси по формуле, выведенной В.И. Макеевым:

$$\vartheta = \vartheta_H \cdot \varepsilon \left(1 + 0,01 \sqrt{\frac{r_0 \cdot \vartheta_H}{\nu}} \right),$$

где r_0 – радиус сферического облака, м.

Исходные данные для расчёта:

- нормальная скорость горения $\vartheta_H = 2,67$ м/с;
- степень расширения продуктов сгорания $\varepsilon = 6,9$;
- кинематический коэффициент вязкости $\nu = 20 \cdot 10^{-6}$ м²/с;
- радиус газового облака равен 10 м;
- температура окружающей среды $T_0 = 300$ К.

$$\vartheta = 2,67 \cdot 6,9 \left(1 + 0,01 \sqrt{\frac{10 \cdot 2,67}{20 \cdot 10^{-6}}} \right) = 231 \text{ м/с.} \quad (3.21)$$

И теперь определим видимую скорость распространения пламени по формуле (3.6). Последовательность расчёта аналогична расчету для пропановоздушной смеси.

Определяем скорость распространения фронта детонационной волны D_d . Для водородовоздушной смеси $k_d = 1,280$, $\rho_{см} = 0,884$ кг/м³ $q_m = 3420$ кДж/кг; $\Delta = 0,01$ м.

$$D_d = \sqrt{2000 \cdot (1,280^2 - 1) \cdot 2955} = 1942, \text{ м/с.} \quad (3.22)$$

Скорость движения продуктов детонации на фронте детонационной волны составит:

$$\vartheta_d = \frac{1942}{1,280+1} = 851 \text{ м/с.} \quad (3.23)$$

Избыточное давление на фронте детонационной волны:

$$P_{изб}^{\Phi} = \frac{0,884 \cdot 1942^2}{1,280+1} \cdot 10^{-3} = 1462 \text{ кПа} \quad (3.24)$$

Рассчитываем критический радиус газового облака $R_{кр}$:

$$R_{кр} = \frac{851 \cdot 0,01}{18,42 \cdot \left(\frac{1462}{101}\right)^{3/2}} = 0,008 \text{ м.} \quad (3.25)$$

И находим видимую скорость распространения пламени по формуле (3.6):

$$\vartheta = 2,67 \cdot 6,9 \cdot \left(\frac{14,27}{0,008}\right)^{\frac{3}{8}} = 305 \text{ м/с.} \quad (3.26)$$

Анализ полученных результатов определения видимой скорости распространения пламени для различных газоздушных смесей позволяет сказать о хорошей согласованности значений. Это подтверждает работоспособность разработанного метода определения видимой скорости распространения пламени и возможность её применения. Результаты расчётов сведены в таблицу 3.1.

Таблица 3.1. Сравнение результатов расчета скорости распространения фронта пламени

Горючая смесь	Скорость распространения пламени	
	Существующий метод	Разработанный метод
Водородовоздушная	272 м/с (В.И. Макеев)	305 м/с
Этиленовоздушная	38,36 м/с (Д.З. Хуснутдинов)	49 м/с
Метановоздушная	6,4 м/с (В.И. Макеев)	5,8 м/с
	11,2 м/с (Д.З. Хуснутдинов)	
Пропановоздушная	15,4 м/с (В.И. Макеев)	16,6 м/с
	19,1 м/с (Д.З. Хуснутдинов)	

Выводы

1. В ходе экспериментальных исследований горения пропановоздушной смеси стехиометрического состава было установлено следующее:

– при зажигании в центре газового облака скорость распространения пламени в 2 раза больше, чем при его зажигании на границе;

– при дрейфе газового облака или его распространении в результате диффузии и при воспламенении скорость распространения пламени почти не ускоряется, поэтому дефлаграционный взрыв характерен только скоротечными тепловыми нагрузками (турбулизаторы смеси отсутствуют);

– фронт пламени ускоряется, движется постоянно и замедляется на расстоянии 30 %, 55 % и 15 % от расстояния пройденное пламенем соответственно;

– реальный размер продуктов сгорания в трубе составляет не более $0,75 R_{об}$ ε.

2. Получена формула для определения СРФП, учитывающая физико-химические и газодинамические свойства горючей смеси.

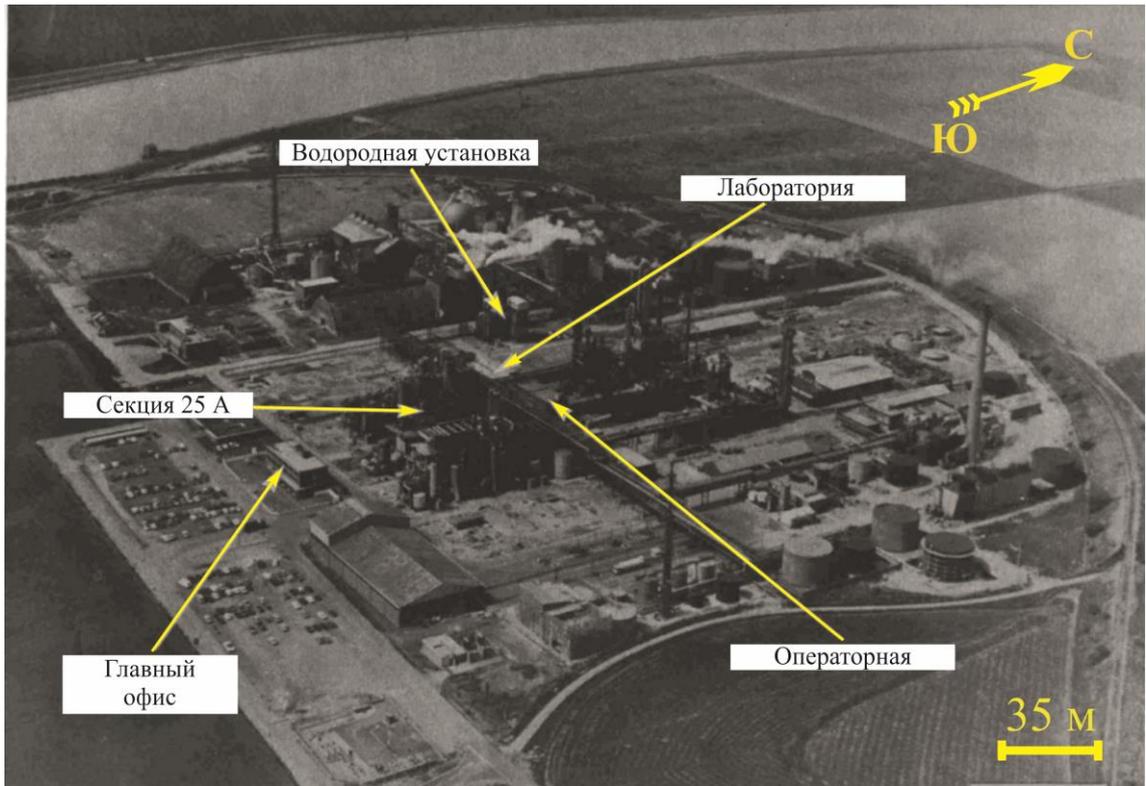
3. Результаты расчётов по полученной формуле для определения СРФП удовлетворительно согласуются с результатами расчётов по формулам других авторов.

ГЛАВА 4 ВЕРИФИКАЦИЯ УСОВЕРШЕНСТВОВАННОЙ МЕТОДИКИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ СКОРОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ФРОНТА ПЛАМЕНИ ПРИ СГОРАНИИ ГАЗОВОЗДУШНОЙ СМЕСИ НА ОСНОВЕ СРАВНИТЕЛЬНОГО АНАЛИЗА РЕЗУЛЬТАТОВ РАСЧЁТА С ПОСЛЕДСТВИЯМИ РЕАЛЬНЫХ АВАРИЙНЫХ ВЗРЫВОВ

Для выяснения правильности применения методов в определении СРФП в предложенных методиках [5, 6, 15], и методики, описанной в главе 3, рассмотрены реальные взрывы, произошедшие на заводе «Нипро Кемикл Планта» и на 2169 км участка газопровода «Нижневартовск–Курган–Куйбышев». В дальнейшем для удобства изложения параметры взрыва, рассчитанные по методикам [5, 6], будем называть вариант I, по методике [15] – вариант II, и по методике, предложенной в настоящей работе – вариант III.

4.1 Взрыв на заводе «Нипро Кемикл Планта» в г. Фликсборо (Англия)

1 июня 1974 г. на установке окисления циклогексана (секция 25), которая расположена на предприятии по выпуску капролактама, в результате разрыва байпаса произошла утечка циклогексана. Циклогексан в установке находился при температуре на 70 °С выше температуры кипения, что привело к мгновенному испарению и образованию паров облака массой 56000 кг. При достижении печи риформинга водорода облако паров циклогексана воспламенилось, после чего последовал взрыв. Здания, располагавшиеся на территории, сильно пострадали. Здание операторной и основные служебные помещения были полностью разрушены из-за взрыва (см. рисунок 4.1).



а)



б)

Рисунок 4.1 – Здания и сооружения, расположенные на территории завода «Нипро Кемикл Планта» [91]:
а – до взрыва; б – после взрыва

По оценкам исследователей такие масштабы разрушений зданий и сооружений соответствуют параметрам наземного взрыва 32 тонн тротила. По энергии это эквивалентно взрыву 8000 кг паров циклогексана. На рисунке 4.2 показаны уровни разрушений от рассмотренного взрыва.

Завод располагался на равнинной местности, поэтому вследствие взрыва в близлежащих посёлках Эмкотс (800 м), Фликсборо (1130 м) и город Бертон-он-Стейтер (3220 м) были разрушены дома и выбиты стёкла [92, 93].

Из анализов фотографий следует, что на территории предприятия располагались здания, выполненные из кирпича или железобетонных панелей, высотой в 2–3 этажа.

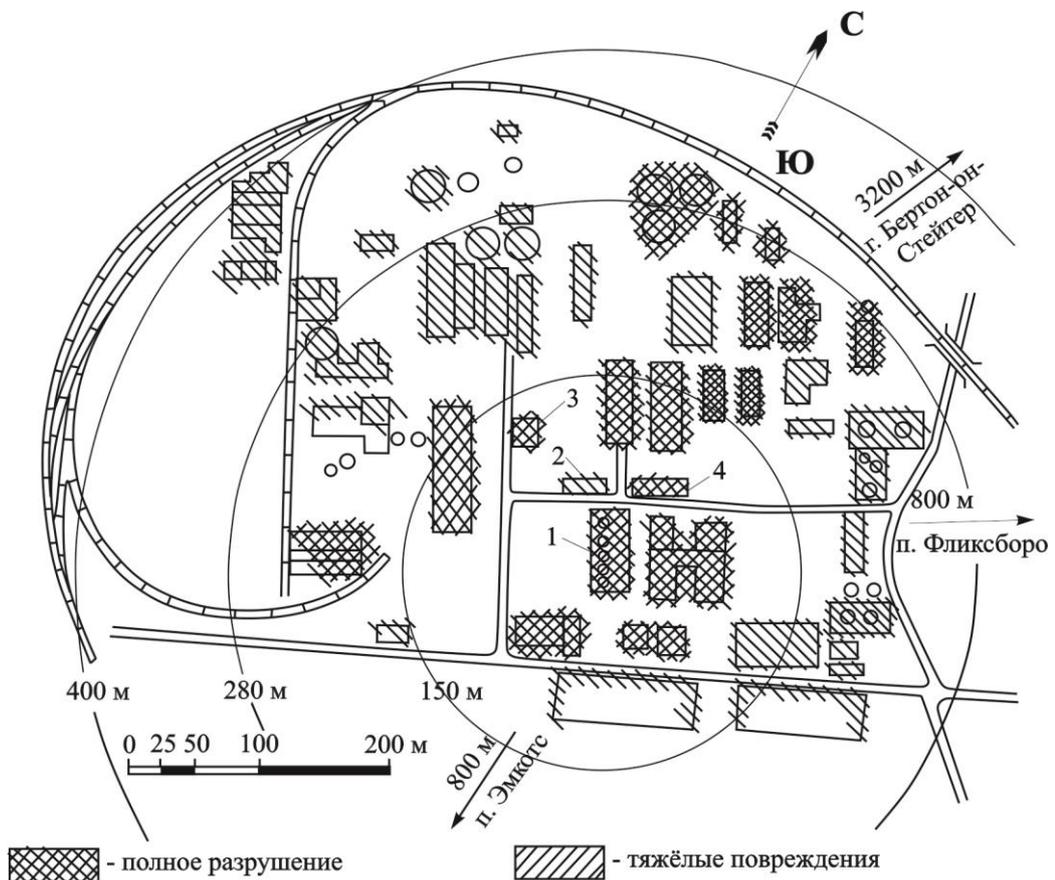


Рисунок 4.2 – План-схема разрушений зданий и сооружений на заводе «Нипро Кемикл Планта»

от взрыва облака паров циклогексана [3]:

1 – установка циклогексана (секция 25А); 2 – лаборатория;

3 – водородная установка; 4 – операторная

Для определения параметров взрыва и расчёта зон разрушений приняты следующие исходные данные:

- тип топлива – циклогексан (C_6H_{12});
- стехиометрическая концентрация циклогексана с воздухом – $78,5 \text{ г/м}^3$;
- масса циклогексана, участвовавшего во взрыве – 8000 кг ;
- удельная теплота сгорания топлива – $4,22 \cdot 10^7 \text{ Дж/кг}$.

4.1.1 Расчёт параметров взрыва по «Методике оценки последствий аварийных взрывов топливно-воздушных смесей» (Вариант I)

Согласно классификации веществ (таблица № 1, приложение № 3 указанной методики) циклогексан относится к 3 классу опасности (среднечувствительные вещества). Окружающее пространство относится к виду 2 (сильно загромождённое пространство: наличие полузамкнутых объёмов, высокая плотность размещения технологического оборудования, лес, большое количество повторяющихся препятствий).

В соответствии с таблицей № 2 приложения № 3 ожидаемый режим взрывного превращения ТВС – диапазон 3 (дефлаграция, скорость фронта пламени $200 \div 300 \text{ м/с}$). Для проверки режима рассчитаем скорость фронта пламени по формуле:

$$\vartheta = k_1 \cdot M_T^{1/6} = 43 \cdot 8000^{1/6} = 192 \text{ м/с}, \quad (4.1)$$

где k_1 – константа, равная 43;

M_T – масса циклогексана.

Так как V_T меньше максимальной скорости диапазона взрывного превращения, то принимаем СРФП $V_T = 300 \text{ м/с}$.

Определяем эффективный энергозапас ТВС:

$$E = 2 \cdot M_T \cdot q_T = 2 \cdot 8000 \cdot 4,22 \cdot 10^7 = 6,75 \cdot 10^{11} \text{ Дж}. \quad (4.2)$$

Рассчитываем безразмерное расстояние для 100; 200; 300; 400 м.

$$R_x = R/(E/P_0)^{1/3} \quad (4.3)$$

$$R_x^{100} = 0,5313; R_x^{200} = 1,0627; R_x^{300} = 1,5940; R_x^{400} = 2,1254.$$

Определяем параметры взрыва при скорости $V_r = 300$ м/с. Рассчитываем безразмерное давление и импульс фазы сжатия:

$$P_{x1} = \left(\frac{\vartheta}{c_0}\right)^2 \cdot \left(\frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon}\right) \cdot \left(\frac{0,83}{R_x} - \frac{0,14}{R_x^2}\right); \quad (4.4)$$

$$I_{x1} = \left(\frac{\vartheta}{c_0}\right)^2 \cdot \left(\frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon}\right) \cdot \left(1 - 0,4 \left(\frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon}\right) \left(\frac{\vartheta}{c_0}\right)\right) \cdot \left(\frac{0,06}{R_x} - \frac{0,01}{R_x^2} - \frac{0,0025}{R_x^3}\right); \quad (4.5)$$

где ε – коэффициент расширения продуктов сгорания ($\varepsilon = 7$);

c_0 – скорость звука в воздухе, 340 м/с.

Далее по формулам вычисляются величины P_{x2} и I_{x2} , которые соответствуют режиму детонации:

$$P_{x2} = \exp(-1,124 - 1,66 \ln(R_x) + 0,26(\ln(R_x))^2); \quad (4.6)$$

$$I_{x2} = \exp(-3,4217 - 0,898 \ln(R_x) + 0,0096(\ln(R_x))^2); \quad (4.7)$$

И окончательные значения P_x и I_x выбираются из условий:

$$P_x = \min(P_{x1}, P_{x2}); I_x = \min(I_{x1}, I_{x2}). \quad (4.8)$$

После определения безразмерных величин давления и импульса фазы сжатия определяются размерные им величины:

$$P_1 = P_x \cdot P_0, \text{ кПа}; I_1 = I_x \cdot (P_0)^{2/3} \cdot E^{1/3} / c_0, \text{ Па}\cdot\text{с}. \quad (4.9)$$

Результаты расчётов P_{x1} и I_{x1} , P_{x2} и I_{x2} , P и I для расстояний 100; 200; 300; 400 м от центра взрыва приведены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Результаты расчётов для различных расстояний от центра взрыва

$R, \text{ м}$	R_x	P_{x1}	I_{x1}	P_{x2}	I_{x2}	$P_1, \text{ кПа}$	$I_1, \text{ Па}\cdot\text{с}$
100	0,5313	0,7115	0,0695	1,0301	0,0574	72,1	3219,4
200	1,0627	0,4385	0,0334	0,2941	0,0309	29,8	1734,2
300	1,5940	0,3107	0,0216	0,1586	0,0214	16,1	1202,5
400	2,1254	0,2399	0,0159	0,1078	0,0165	10,9	893,0
800	4,2508	0,1251	0,0077	0,0507	0,0087	5,1	433,0
1100	5,8448	0,0920	0,0056	0,0390	0,0065	3,9	312,0
3200	17,0032	0,0323	0,0019	–	–	–	–

На расстоянии 3200 м от центра взрыва невозможно определить параметры взрыва, так как решения выходят за пределы применимости выражений.

4.1.2 Расчёт параметров взрыва по «Методике расчёта нагрузок на здания и сооружения при воздействии внешних дефлаграционных взрывов»

В настоящем разделе для расчёта динамических параметров волн сжатия дефлаграционного взрыва СРФП вначале будет определена по методике, предложенной Д.З. Хуснутдиновым [15], затем – по методике, описанной в главе 3 настоящей работы.

4.1.2.1 Расчёт скорости распространения фронта пламени, по методике предложенной Д.З. Хуснутдиновым (Вариант II)

Значение СРФП, не возмущенной средой, определяется по формуле (1.46) [15]:

$$v_{\text{нв}} = v_{\text{н}} \cdot \varepsilon \cdot \left(1 + A \cdot \sqrt{\frac{R_p}{\Delta}} \right), \text{ м/с.}$$

Нормальная скорость горения циклогексана $U_{\text{н}} = 0,43$ м/с, а степень расширения продуктов сгорания равна $\varepsilon = 8,1$. Тогда параметр A рассчитывается по формуле (1.47) [15]:

$$A = \frac{0,59}{\left[(1 + 0,68(3,48 - 2,55))^{0,44} \right]} = 0,47$$

Размер детонационной ячейки для циклогексана как справочная величина отсутствует, поэтому была принята равной $\Delta = 0,1$ м (см. таблицу 1, приложения 3 [5]).

Так как данные по размеру газового облака отсутствуют, то значение R_p будем брать равным размеру облака, которое участвовало в формировании надземного взрыва:

$$R_p = R_{\text{об}} = 0,782 \cdot \sqrt[3]{8000 \cdot 1000/78,5} = 36,5 \text{ м.} \quad (4.10)$$

Тогда видимая скорость распространения пламени, не возмущённая средой, равняется:

$$v_{\text{нв}} = 0,43 \cdot 8,1 \cdot \left(1 + 0,47 \cdot \sqrt{36,5/0,1} \right) = 34,7 \text{ м/с.} \quad (4.11)$$

И скорость распространения пламени с учётом внешних условий равна:

$$\vartheta_2 = K_1 \cdot K_2 \cdot \vartheta_{\text{нв}} = 2 \cdot 4 \cdot 34,7 = 277,6 \text{ м/с}, \quad (4.12)$$

где K_1 – коэффициент, учитывающий интенсивность инициирования взрывного горения ($K_1 = 2$); K_2 – коэффициент, учитывающий вид препятствий, преодолеваемых пламенем ($K_2 = 4$).

4.1.2.2 Расчёт скорости распространения фронта пламени по методике, описанной в главе 3 (Вариант III)

Определение скорости распространения пламени определяется в той последовательности, которая описана в части 3.4 главы 3 настоящего исследования.

Скорость распространения фронта детонационной волны:

$$D_d = \sqrt{2000 \cdot (1,288^2 - 1) \cdot 2793} = 1918 \text{ м/с}, \quad (4.13)$$

где $k_d = 1,288$ – показатель адиабаты в продуктах взрыва;

$q_m = 2793$ – удельная энергия взрыва стехиометрической смеси, кДж/кг.

Скорость движения продуктов детонации на фронте:

$$\vartheta_d = 1918 / (1,288 + 1) = 838 \text{ м/с}. \quad (4.14)$$

Избыточное давление на фронте детонационной волны:

$$P_{\text{изб}}^{\Phi} = \frac{1,232 \cdot 1918^2}{1,288 + 1} \cdot 10^{-3} = 1980 \text{ кПа}, \quad (4.15)$$

где $\rho_{\text{см}} = 1,232$ – плотность смеси до взрыва, кг/м³.

Расстояние, через которое горение смеси перейдет в турбулентное горение:

$$R_{\text{кр}} = \frac{838 \cdot 0,1}{0,43 \cdot 8,1 \cdot \left(\frac{1980}{101}\right)^{3/2}} = 0,277 \text{ м} \quad (4.16)$$

Скорость распространения пламени, не возмущённая влиянием внешней среды, равна:

$$\vartheta_{\text{нв}} = 0,43 \cdot 8,1 \cdot \left(\frac{36,5}{0,277}\right)^{\frac{3}{8}} = 21,7 \text{ м/с}. \quad (4.17)$$

С учётом влияния условий окружающей среды скорость распространения пламени равна:

$$\vartheta_3 = 2 \cdot 4 \cdot 21,7 = 174 \text{ м/с}. \quad (4.18)$$

Определив СРФП, можно перейти к определению параметров взрыва.

Рассчитываем радиус огненного шара:

$$R_{\text{ош}} = R_{\text{об}} \cdot \varepsilon^{1/3} = 36,5 \cdot 8,1^{1/3} = 73,3 \text{ м.} \quad (4.19)$$

Приведенное расстояние от центра рассчитывается по формуле:

$$R^0 = R / R_{\text{ош}}, \quad (4.20)$$

где R – расстояние, на котором определяется давление взрыва.

Определяем максимальное давление на фронте пламени. Так как $W > 140 \text{ м/с}$, то максимальное давление рассчитывается по формуле (1.34):

$$P_{\text{max}}^2 = 24,22 + \left(\frac{277-140}{4,745} \right)^{1,232} = 87,2 \text{ кПа,} \quad (4.21)$$

$$P_{\text{max}}^3 = 24,22 + \left(\frac{174-140}{4,745} \right)^{1,232} = 35,5 \text{ кПа.} \quad (4.22)$$

Максимальное давление взрыва на искомым расстояниях рассчитывается по формуле:

$$P = \frac{P_{\text{max}}}{1+B(R^0-1)^C}, \text{ кПа,} \quad (4.23)$$

где B и C – коэффициент и показатель степени, определяются в зависимости от величины скорости распространения пламени ($B_1 = 0,506$ и $C_1 = 1,107$; $B_2 = 0,554$ и $C_2 = 1,035$).

Удельный импульс фазы сжатия рассчитывается по формуле:

$$I_{\text{уд}} = 0,38 \cdot P \cdot \tau_5, \quad (4.24)$$

где τ_5 – длительность положительной фазы.

Результаты расчётов избыточного давления и импульса фазы сжатия приведены в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Значения избыточного давления и импульса фазы сжатия

Определяемые величины	Расстояние от центра взрыва, м						
	100	200	300	400	800	1100	3200
R^0	1,363	2,726	4,089	5,452	10,905	14,995	43,622
P_2 , кПа	74,8	44,9	31,5	23,8	11,7	8,38	2,61
$I_{\text{уд}2}$, Па·с	3250,2	1965,7	1369,9	1039,2	511,2	364,3	114,0
P_3 , кПа	29,7	17,9	12,8	9,9	5,1	3,7	1,3
$I_{\text{уд}3}$, Па·с	3489,6	2110,1	1498,7	1157,8	599,9	438,5	149,2

4.1.3 Оценка возможных последствий взрыва

Производить оценку вероятности степени повреждений зданий и сооружений, а также радиусов зон поражения можно способом, описанным в [5]. Также для оценки разрушающего действия волны сжатия можно воспользоваться данными по предельным значениям избыточных давлений, соответствующих различным степеням разрушения зданий [94].

В первом случае рассчитывается пробит-функция в зависимости от степени повреждений зданий, и вероятность их поражения определяется по таблице 4.3:

– повреждение промышленных зданий, при которых возможно их восстановление:

$$\text{Pr}_1 = 5 - 0,26\ln(V_1), \quad (4.25)$$

$$V_1 = (17500/P)^{8,4} + (290/I)^{9,3}; \quad (4.26)$$

– повреждение зданий, при которых они подлежат сносу:

$$\text{Pr}_2 = 5 - 0,22\ln(V_2), \quad (4.27)$$

$$V_2 = (40000/P)^{7,4} + (460/I)^{11,3} \quad (4.28)$$

Таблица 4.3 – Связь вероятности поражения с пробит-функцией

<i>p</i> , %	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	–	2,67	2,95	3,12	3,25	3,38	3,45	3,52	3,59	3,66
10	3,72	3,77	3,82	3,86	3,92	3,96	4,01	4,05	4,08	4,12
20	4,16	4,19	4,23	4,26	4,29	4,33	4,36	4,39	4,42	4,45
30	4,48	4,50	4,53	4,56	4,59	4,61	4,64	4,67	4,69	4,72
40	4,75	4,77	4,80	4,82	4,85	4,87	4,90	4,92	4,95	4,97
50	5,00	5,03	4,05	5,08	5,10	5,13	5,15	5,18	5,20	5,23
60	5,25	5,28	5,31	5,33	5,36	5,39	5,41	5,44	5,47	5,50
70	5,52	5,55	5,58	5,61	5,64	5,67	5,71	5,74	5,77	5,81
80	5,84	5,88	5,92	5,95	5,99	6,04	6,08	6,13	6,18	6,23
90	6,28	6,34	6,41	6,48	6,55	6,64	6,75	6,88	7,05	7,33
99	7,33	7,37	7,41	7,46	7,51	7,58	7,65	7,75	7,88	8,09

Рассчитать радиус зоны поражения можно по формуле:

$$R = K \frac{\sqrt[3]{W_T}}{\left[1 + \left(\frac{3180}{W_T}\right)^2\right]^{\frac{1}{6}}}, \text{ м} \quad (4.29)$$

где K – уровни разрушения зданий ($K = 3,8$ – полное разрушение здания; $K = 5,6$ – тяжёлые повреждения, здание подлежит сносу; $K = 9,6$ – средние повреждения, возможно восстановления здания; $K = 28,0$ – разрушение оконных проёмов, легкобрасываемых конструкций; $K = 56$ – частичное разрушение остекления);

W_T – тротиловый эквивалент взрыва, определяется соотношением:

$$W_T = \frac{0,4 q_T}{0,9 q_T} M_T, \text{ кг}, \quad (4.30)$$

где q_T – теплота сгорания газа, Дж/кг.

Во втором случае достаточно знать избыточное давление волны сжатия и сравнить со значениями, приведёнными в таблице 4.4.

Таблица 4.4 – Значения предельных избыточных давлений, соответствующих различным степеням разрушений зданий

Характеристика зданий	Давление P , (кПа) при степенях разрушения		
	слабая	средняя	сильная
Одноэтажные промышленные:			
– с кирпичными несущими стенами;	1–5	5–10	10–15
– каркасные	1–5	5–10	8–30
Многоэтажные промышленные:			
– с кирпичными несущими стенами;	1–5	5–15	10–30
– каркасные	1–5	5–10	8–20
Общественные:			
– каменные (кирпичные блочные);	1–5	5–15	10–30
– каркасные до шести этажей;	1–5	5–10	8–20
– каркасные свыше шести этажей;	1–5	5–10	8–15
– панельные до трех этажей;	1–5	5–15	15–35
– панельные свыше трех этажей	1–5	5–15	15–25
Жилые:			
– каменные;	1–5	5–20	15–30
– панельные до пяти этажей;	1–5	5–15	10–30
– панельные свыше пяти этажей точечного типа	1–5	5–12	10–25

По классификации института АО «ЦНИИПромзданий» степени повреждений зданий определяются как: слабые – разрушение заполнения оконных и дверных проёмов; средние – разрушение окон, дверей, внутренних перегородок, двускатных крыш. Разрушение отдельных участков самонесущих кирпичных стен и

отдельных стеновых панелей из легких бетонов; сильные – разрушение самонесущих кирпичных стен, стеновых панелей из лёгких бетонов. Повреждения отдельных основных несущих конструкций (плит покрытия и перекрытия, балок, ригелей и колонн каркаса, несущих кирпичных стен, стеновых наружных и внутренних панелей, лестничных маршей) и узлов их крепления.

Оценка вероятности повреждения зданий и сооружений и определение радиусов зон поражения

Результаты расчётов вероятности повреждения (Pr_1) промышленных зданий и их разрушения (Pr_2) при параметрах взрывов, указанных в таблицах 4.1 и 4.2 на соответствующих расстояниях, приведены в таблице 4.5.

Таблица 4.5 – Вероятность повреждения и разрушения промышленных зданий

Вероятность, %	Радиус R , м						
	100	200	300	400	800	1100	3200
$\vartheta_1 = 300$ м/с (Вариант I)							
$p (Pr_1)$	99,9	87	42	15	~ 0	~ 0	~ 0
$p (Pr_2)$	83	32	7	2	~ 0	~ 0	~ 0
$\vartheta_2 = 277,6$ м/с (Вариант II)							
$p (Pr_1)$	99,9	98	90	75	19	5	~ 0
$p (Pr_2)$	84	57	35	20	2	~ 0	~ 0
$\vartheta_3 = 174$ м/с (Вариант III)							
$p (Pr_1)$	87	51	24	10	~ 0	~ 0	~ 0
$p (Pr_2)$	31	10	3	1	~ 0	~ 0	~ 0

В таблице 4.6 приведены радиусы зон поражения для соответствующих степеней разрушения промышленных зданий.

Таблица 4.6 – Уровни разрушения здания и радиусы зон поражения

№ п/п	Характеристика повреждения здания	r , м
1	Полное разрушение здания	122
2	Тяжёлые повреждения, здание подлежит сносу	180
3	Средние повреждения, возможно восстановление здания	308
4	Разрушение оконных проёмов, легкобрасываемых конструкций	900
5	Частичное разрушение остекления	1800

4.1.4 Анализ результатов расчёта и последствий взрыва

В результате взрыва на территории завода находившиеся здания и сооружения в радиусе 300 м от места взрыва были полностью разрушены. Эти данные достаточно хорошо согласуются с результатами расчёта избыточных давлений по трем вариантам и по данным, приведенным в таблицах 4.5 и 4.6.

В таблице 4.7 обобщены результаты расчётов избыточных давлений и импульсов фаз сжатия по трем вариантам.

Таблица 4.7 – Обобщение результатов расчетов по трем вариантам

Определяемые величины	Расстояние от центра взрыва, м						
	100	200	300	400	800	1100	3200
P_1 , кПа	72,1	29,8	16,1	10,9	5,1	3,9	–
$I_{уд1}$, Па·с	3219,4	1734,2	1202,5	893,0	433,0	312,0	–
P_2 , кПа	74,8	44,9	31,5	23,8	11,7	8,38	2,61
$I_{уд2}$, Па·с	3250,2	1965,7	1369,9	1039,2	511,2	364,3	114,0
P_3 , кПа	29,7	17,9	12,8	9,9	5,1	3,7	1,3
$I_{уд3}$, Па·с	3489,6	2110,1	1498,7	1157,8	599,9	438,5	149,2

Создаваемое избыточное давление на расстоянии 100 м от места взрыва по вариантам I, II отличается в 2,5 раза от значения, полученного в варианте III. Сопоставляя избыточное давление с данными, приведёнными в таблице 4.4, можно прийти к выводу, что рассчитанное избыточное давление по варианту III на расстоянии 100 м может привести к таким же последствиям, что и по вариантам I, II. С дальнейшим удалением от места взрыва (100÷1100 м) результаты лучше сходятся по варианту I и III. Но определить, какой из вариантов лучше описывает реальные последствия, очень сложно, так как на расстоянии 400 м от места взрыва территория завода заканчивается, и начинается открытая местность, а имеющиеся на заводе разрушения подтверждаются всеми тремя вариантами расчета.

Что касается поврежденных жилых домов и разрушенных оконных проёмов в п. Эмкотс (800 м) и п. Фликсборо (1130 м), то сопоставляя значения параметров взрыва на данных расстояниях и значения предельных избыточных давлений, соответствующих различным степеням разрушения жилых домов (таблица 4.4),

можно предположить, что такие последствия могли иметь место. Это подтверждается и расчётом зоны разрушения, где в радиусе 1800 м имеет место частичное разрушение остекления.

4.2 Взрыв на участке магистрального газопровода «Нижевартговск–Курган–Куйбышев»

В 2010 г. в результате коррозионного износа газопровода в Самарской области вблизи п. Черновка произошёл аварийный выброс тяжелых углеводородных фракций (пропан) с образованием стелющегося взрывоопасного облака на значительной территории. При достижении источника зажигания произошло взрывное горение облака в виде «огневого шторма». Время существования «огневого шторма» было достаточно велико, поэтому его можно назвать пожаром. В результате взрыва и пожара погибли люди и сгорел автомобиль, который располагался неподалёку от места истечения [95, 96]. Последствия аварии представлены на рисунке 4.3.



Рисунок 4.3 – Фотография с места аварии сразу после локализации пожара [95]

В ходе расследования было установлено, что взрывоопасное облако сформировалось в результате истечения пропана через два аварийных отверстия с расходом 150 л/с и 1500 л/с в течение 4 часов. При переводе в массу это составляет 29,6 тонн пропана. Источником зажигания стал автомобиль, по другой версии – сами люди: на месте, где они погибли, было обнаружено много сигаретных окурков. В момент формирования взрывоопасного облака происходило незначительное движение атмосферы со скоростью 25 м/час. Высота облака достигала 5–7 м.

Исходные данные для расчёта параметров взрыва:

- тип топлива – пропан (C_3H_8);
- стехиометрическая концентрация пропана с воздухом – $75,2 \text{ г/м}^3$;
- масса пропана – 29600 кг;
- коэффициент Z участия пропана в горении – 0,5;
- удельная теплота сгорания топлива – $4,64 \cdot 10^7 \text{ Дж/кг}$.

Взрывоопасные свойства пропановоздушной смеси представлены в таблице 4.8.

Таблица 4.8 – Параметры пропановоздушной смеси

Стехиометрическая смесь	Δ , м	ϑ_n , м/с	ε	A	q_m , кДж/кг	K_d	$\rho_{см}$, кг/м ³
C_3H_8 + воздух	0,069	0,45	8,06	0,34	2797	1,286	1,246

4.2.1 Расчёт параметров взрыва по «Методике оценки последствий аварийных взрывов топливно-воздушных смесей» (Вариант I)

Пропан относится ко 2 классу опасности (чувствительные вещества). Окружающее пространство – к 4 виду (слабо загромождённое и свободное пространство). Ожидаемый режим взрывного превращения – диапазон 4 (дефлаграция, скорость фронта пламени 150–200 м/с).

Рассчитываем скорость фронта пламени для проверки условия режима сгорания:

$$\vartheta = k_1 \cdot Z \cdot M_{\Gamma}^{1/6} = 43 \cdot 0,5 \cdot 29600^{1/6} = 119 \text{ м/с.} \quad (4.31)$$

Так как V_{Γ} меньше максимальной скорости диапазона взрывного превращения, то скорость распространения пламени принимаем 200 м/с.

Эффективный энергозапас ТВС:

$$E = 2 \cdot Z \cdot M_{\Gamma} \cdot q_{\Gamma} = 2 \cdot 0,5 \cdot 29600 \cdot 4,64 \cdot 10^7 = 13,7 \cdot 10^{11} \text{ Дж.} \quad (4.32)$$

Расчёт параметров взрыва проводили для расстояний от места взрыва 100; 200; 300; 400; 1000 м. Результаты приведены в таблице 4.9.

Таблица 4.9 – Результаты расчетов параметров взрыва

R, м	R_x	P_{x1}	I_{x1}	P_{x2}	I_{x2}	P_1 , кПа	I_1 , Па·с
100	0,419	0,351	0,0669	1,6763	0,0708	35,5	4756,6
200	0,838	0,234	0,0328	0,4393	0,0383	23,7	2335,5
300	1,257	0,169	0,0213	0,2253	0,0266	17,2	1511,4
400	1,676	0,132	0,0156	0,1478	0,0205	13,4	1111,4
1000	4,190	0,0564	0,0060	0,0514	0,0088	5,2	425,2

4.2.2 Расчёт параметров взрыва по «Методике расчёта нагрузок на здания и сооружения при воздействии внешних дефлаграционных взрывов»

4.2.2.1 Расчёт скорости распространения фронта пламени, по методике Д.З. Хуснутдинова (Вариант II)

Согласно исходным данным облако имело высоту от 5 до 7 м. Принимая среднее значение $H_{об} = 6$ м и учитывая полученные в главе 3 данные по формированию размера огненного шара, разгон пламени считаем равным $R_p = 0,75 \cdot 6 \cdot \sqrt[3]{8,06} = 9,0$ м.

Видимая скорость распространения пламени, не возмущённая средой, равна:

$$\vartheta_{\text{HB}} = 0,45 \cdot 8,06 \cdot (1 + 0,34 \cdot \sqrt{9,0/0,069}) = 17,7 \text{ м/с.} \quad (4.33)$$

И с учётом внешних условий скорость распространения пламени равна:

$$\vartheta_2 = K_1 \cdot K_2 \cdot \vartheta_{\text{HB}} = 2 \cdot 2 \cdot 17,7 = 70,8 \text{ м/с.} \quad (4.34)$$

4.2.2.2 Расчёт скорости распространения фронта пламени по методике, описанной в главе 3 (Вариант III)

Скорость распространения фронта детонационной волны:

$$D_d = \sqrt{2000 \cdot (1,286^2 - 1) \cdot 2797} = 1912 \text{ м/с.} \quad (4.35)$$

Скорость движения продуктов детонации на фронте:

$$\vartheta_d = 1912 / (1,286 + 1) = 836 \text{ м/с.} \quad (4.36)$$

Избыточное давление на фронте детонационной волны:

$$P_{изб}^{\phi} = \frac{1,246 \cdot 1912^2}{1,286 + 1} \cdot 10^{-3} = 1992 \text{ кПа.} \quad (4.37)$$

Расстояние, через которое горение смеси перейдет в турбулентное горение:

$$R_{кр} = \frac{836 \cdot 0,069}{0,45 \cdot 8,06 \cdot \left(\frac{1992}{101}\right)^{3/2}} = 0,181 \text{ м.} \quad (4.38)$$

Видимая скорость распространения пламени, не возмущённая влиянием внешней среды, равна:

$$\vartheta_{нв} = 0,45 \cdot 8,06 \cdot \left(\frac{9,0}{0,181}\right)^{\frac{3}{8}} = 15,69 \text{ м/с.} \quad (4.39)$$

С учётом влияния условий окружающей среды скорость распространения пламени равна:

$$\vartheta_3 = 2 \cdot 2 \cdot 15,69 = 62,7 \text{ м/с.} \quad (4.40)$$

Определяем максимальное избыточное давление по формуле (1.33), так как $W < 140 \text{ м/с}$, для скорости распространения пламени $W_2 = 70,8 \text{ м/с}$ и $W_3 = 62,7 \text{ м/с}$.

$$P_{max}^2 = 24,22 \cdot \left(\frac{70,8}{140}\right)^{1,822} = 6,99 \text{ кПа;} \quad (4.41)$$

$$P_{max}^3 = 24,22 \cdot \left(\frac{62,7}{140}\right)^{1,822} = 5,60 \text{ кПа.} \quad (4.42)$$

Радиус облака и размер огненного шара для надземного взрыва составляют:

$$R_{об} = 0,782 \cdot \sqrt[3]{29600 \cdot 0,5 \cdot 1000 / 75,2} = 45,5 \text{ м,} \quad (4.43)$$

$$R_{ОШ} = 45,5 \cdot 8,06^{1/3} = 91,2 \text{ м.} \quad (4.44)$$

Значения избыточного давления и импульса фазы сжатия для расстояний 100; 200; 300; 400; 1000 м от места взрыва представлены в таблице 4.10.

Таблица 4.10 – Значения избыточного давления и импульса фазы сжатия

Определяемые величины	Расстояние от центра взрыва, м				
	100	200	300	400	1000
P_2 , кПа	6,6	4,1	3,0	2,3	1,0
$I_{уд2}$, Па·с	3334	2072	1494	1165	498
P_3 , кПа	5,3	3,2	2,3	1,85	0,8
$I_{уд3}$, Па·с	3071	1897	1370	1072	463

4.2.3 Анализ результатов расчёта и последствий взрыва

Результаты расчёта параметров взрыва по трем вариантам приведены в таблице 4.11.

Таблица 4.11 – Результаты расчёта параметров взрыва по трем вариантам

Определяемые величины	Расстояние от центра взрыва, м				
	100	200	300	400	1000
P_1 , кПа	35,5	23,7	17,2	13,4	5,2
$I_{уд1}$, Па·с	4756	2335,5	1511	1111,4	425,2
P_2 , кПа	6,6	4,1	3,0	2,3	1,0
$I_{уд2}$, Па·с	3334	2072	1494	1165	498
P_3 , кПа	5,3	3,2	2,3	1,85	0,8
$I_{уд3}$, Па·с	3071	1897	1370	1072	463

Значения давления взрыва и импульса фазы сжатия, рассчитанные по варианту II и III, отличаются по абсолютной погрешности максимально на 1,3 кПа и 263 Па·с соответственно. Сравнивая с вариантом I, параметры взрыва сильно различаются по избыточному давлению – приблизительно в 5–6 раз, значения импульса фазы сжатия по всем трём вариантам почти соизмеримы.

В результате взрывной аварии значительная часть территории была выжжена. Также не было обнаружено признаков, характерных для взрыва: разрушенных или повреждённых зданий, сооружений, коммуникаций и т.п., расположенных вблизи места взрывоопасного облака. Расчётами по вариантам II и III хорошо подтверждается, что скорость распространения фронта пламени была мала для создания избыточного давления, способного привести к подобным уровням разрушения (см. таблицу 4.4). Если бы авария произошла по варианту I, то на расстоянии 1000 м имело место разрушение стёкол, чего не наблюдалось.

Выводы

С использованием методик определения скорости распространения фронта пламени, изложенных в [5, 6, 15], и методики, с учетом формулы описанной в главе 3 настоящей работы, были восстановлены сценарии взрыва на предприятии «Нипро Кемикл Планта» и на участке 2169 км магистрального газопровода «Нижевартовск–Курган–Куйбышев». Сравнение расчётных значений избыточного давления и импульса фазы сжатия с последствиями взрыва позволило установить, что значения СРФП, полученные по методикам [15] и усовершенствованной методики, достоверней отражают картину последствий взрыва. Поэтому описанную в главе 3 формулу можно применять для определения СРФП при дефлаграционном взрыве ГВС.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В результате анализа значений основных параметров взрыва, рассчитанных по методикам, математически описывающим дефлаграционный взрыв, установлено, что они дают схожие результаты при одинаковой СРФП. Основное различие заключается в методе определения СРФП. Для одного и того же сценария взрыва ГВС методики прогнозирования СРФП дают существенно разные значения.

2. Разработана математическая модель фототеплового воспламенения для определения показателей пожаровзрывоопасности газовых смесей, основанная на законах химической кинетики и термодинамики. Верификация данной модели подтверждена экспериментальными исследованиями. Удовлетворительная сходимость результатов расчёта и эксперимента при определении концентрационных пределов воспламенения, минимальной флегматизирующей концентрации и температуры самовоспламенения указывает на широкие возможности и перспективы развития такого метода расчёта показателей пожаровзрывоопасности различных горючих газовых смесей.

3. Теоретически обоснована формула для прогнозирования СРФП с учётом физико-химических и газодинамических свойств газовой среды при взрыве ГВС. Верификация усовершенствованной методики на основе сравнительного анализа с эмпирическими методиками других авторов подтвердила возможность её применения для расчёта СРФП при дефлаграционных взрывах ГВС.

4. По усовершенствованной методике прогнозирования СРФП для аварий, произошедших на заводе «Нипро Кемикл Планта» и на 2169 км участка нефтепровода «Нижевартовск–Курган–Куйбышев», рассчитаны значения СРФП. Полученные результаты показали, что предлагаемая методика удовлетворительно прогнозирует возможную СРФП при взрывах ГВС в открытом пространстве.

5. Для дальнейшего развития методики расчёта СРФП необходимо учесть неравномерность распределения концентрации веществ в ГВС, образующихся при аварийных выбросах, и изменение скорости пламени при преодолении пре-

пятствий. Учёт этих обстоятельств позволит повысить точность проводимых расчётов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Уроки, извлечённые из аварий. 2014 [Электронный ресурс]. Ростехнадзор: сайт. – Режим доступа: <http://gosnadzor.ru/industrial/oil/lessons/2014%20год/> (дата обращения 07.12.2017)
2. Комаров, А.А. Взрыв газа на газонаполнительной станции в посёлке Чагода. Причины и последствия [Текст] / А.А. Комаров, Г.В. Васюков, Р.А. Загуменников, Е.В. Бузаев // Пожаровзрывобезопасность.– 2014. – № 7. – С. 58–62.
3. Бесчастнов, М.В. Промышленные взрывы. Оценка и предупреждение [Текст] / М.В. Бесчастнов. – М.: Химия, 1991. – 432 с.
4. Об утверждении Федеральных норм и правил в области промышленной безопасности «Общие правила взрывобезопасности для взрывопожароопасных химических, нефтехимических и нефтеперерабатывающих производств» [Электронный ресурс]: приказ федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 11 марта 2013 г. № 96 // Гарант: инф.-прав. об-ние. – Эл. дан. – М., 2016. – Доступ из лок-ной сети б-ки Академии ГПС МЧС России (дата обращения 07.08.2017)
5. Методика оценки последствий аварийных взрывов топливно-воздушных смесей [Электронный ресурс]: руководство по безопасности // Госнадзор: сайт. – <http://www.gosnadzor.ru/public/discussion/acts/%D0%9F%D1%80%D0%B8%D0%B%D0%BE%D0%B6%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D0%B5%20005.doc> (дата обращения 07.08.2017)
6. Об утверждении методики определения расчетных величин пожарного риска на производственных объектах [Электронный ресурс]: приказ МЧС РФ от 10 июля 2009 г. № 404 // Гарант: инф.-прав. об-ние. – Эл. дан. – М., 2017. – Доступ из лок-ной сети б-ки Академии ГПС МЧС России (дата обращения 07.08.2017)
7. Садовский, М.А. Механическое действие воздушных ударных волн взрыва по данным экспериментальных исследований [Текст] / М.А. Садовский // В кн. Физика взрыва. – М.: Изд. АН СССР, 1952.

8. СП 12.13130.2009. Определение категорий помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности (с Изменением № 1) [Электронный ресурс]: государственный стандарт // Гарант: инф.-прав. об-ние. – Эл. дан. – М., 2017. – Доступ из лок-ной сети б-ки Академии ГПС МЧС России (дата обращения 07.08.2017)

9. ГОСТ Р 12.3.047–2012. Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Пожарная безопасность технологических процессов. Общие требования. Методы контроля [Электронный ресурс]: государственный стандарт // Гарант: инф.-прав. об-ние. – Эл. дан. – М., 2017. – Доступ из лок-ной сети б-ки Академии ГПС МЧС России (дата обращения 07.08.2017)

10. Комаров, А.А. Прогнозирование нагрузок от аварийных дефлаграционных взрывов и оценка последствий их воздействия на здания и сооружения [Текст]: дис. ... д-ра техн. наук: 05.26.03 / Комаров Александр Андреевич. – М., 2001. – 492 с.

11. Комаров, А.А. Обеспечение защиты человека при аварийных взрывах [Текст] / А.А. Комаров // международный симпозиум: Человек и катастрофы: проблемы обучения новым технологиям и подготовки специалистов к действиям в чрезвычайных условиях. – Секция 4. Научные основы защиты человека от катастроф. – М.: ИМАШ РАН, 1999. – С. 40–41.

12. Комаров, А.А. Научные основы нормативной базы по обеспечению взрывоустойчивости объектов [Текст] / А.А. Комаров // науч.-практ. конф.: Современные технологии в строительстве. Образование, наука, практика. – М.: МГСУ, 2001. – С. 77–78.

13. Комаров, А.А. Научные основы нормативной базы по обеспечению взрывоустойчивости объектов [Текст] / А.А. Комаров // научн. конф.: Конференция, посвященная 80-летию МГСУ. – М.: МГСУ, 2001. – С. 77–78.

14. Комаров, А.А. Расчет газодинамических характеристик потоков при аварийных дефлаграционных взрывах на наружных установках [Текст] / А.А. Комаров // Пожаровзрывобезопасность. – 2002. – Т. 11. – № 5. – С. 15–18.

15. Аварийные взрывы газоздушных смесей в атмосфере [Текст]: монография / Д.З. Хуснутдинов, А.В. Мишуев [и др.]. – М.: МГСУ, 2014. – 80 с.
16. Мишуев, А.А. Общие закономерности развития аварийных взрывов и методы снижения взрывных нагрузок до безопасного уровня [Текст] / А.А. Мишуев, А.А. Комаров, Д.З. Хуснутдинов // Пожаровзрывобезопасность. – 2001. – Т. 10. – № 6. – С. 8–19.
17. Численное решение многомерных задач газовой динамики [Текст] / С.К. Годунов, А.В. Забродин, М.Я. Иванов, А.Н. Крайко, Г.П. Прокопов / Под ред. С.К. Годунова. – М.: Наука, 1976. – 400 с.
18. Макеев, В.И. Горение и детонация водородовоздушных смесей в свободных объёмах [Текст] / В.И. Макеев, Ю.А. Гостинцев, В.В. Строгонов и др. // Физика горения и взрыва. – 1983. – № 5. – С. 16–18.
19. Макеев, В.И. Пожарная безопасность зданий, сооружений и объектов [Текст] / В.И. Макеев // Пожаровзрывобезопасность. – 1992. – № 3. – С. 34–45.
20. Методика расчёта нагрузок на здания и людей при внешнем дефлаграционном взрыве [Текст]: учебное пособие / А.В. Мишуев, Д.З. Хуснутдинов. – М.: МГСУ, 2004. – 65 с.
21. Ефремов, К.В. Расчёт зон разрушений зданий и сооружений при взрывах топливно-воздушных смесей на опасных производственных объектах [Текст] / К.В. Ефремов, М.В. Лисанов, А.С. Софьин и др. // Безопасность труда в промышленности. – 2011. – № 9. – С. 70–71.
22. Корольченко, А.Я. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов и средства их тушения [Текст]: справочник. В 2-х ч. / А.Я. Корольченко, Д.А. Корольченко. – М.: Пожнаука, 2004. – Ч. I. – 713 с.; Ч. II. – 774 с.
23. Монахов, В.Т. Показатели пожарной опасности веществ и материалов. Анализ и предсказание. Газы и жидкости [Текст]: монография / В.Т. Монахов. – М., 2007. – 246 с.
24. Карапетьянц, М.Х. Методы сравнительного расчёта физико-химических свойств [Текст] / М.Х. Карапетьянц. – М.: Наука, 1965.

25. Агафонов, И.А. Анализ и прогнозирование пожароопасных свойств индивидуальных алканов [Текст] / И.А. Агафонов, И.К. Гаркушин, Д.В. Люстрицкая, С.Г. Снопов // Пожаровзрывобезопасность. – 2009. – Т. 18. – № 2. – С. 16–19.

26. Vidal, M. A Review of estimation methods for flash points and flammability limits / M. Vidal, W.J. Rogers, J.C. Holste, M.S. Mannan // Process Saf. Progress, 2004, vol. 23, No. 1, pp. 47–55.

27. Zabetakis, M.G. Flammability characteristics of combustible gases and vapors / M.G. Zabetakis // U.S. Bureau of Mines. Bulletin 627. – Washington : U.S. Dept. of the Interior, Bureau of Mines, 1965, 121 p.

28. Корольченко, А.Я. Расчет показателей пожаровзрывоопасности веществ и материалов [Текст] / А.Я. Корольченко // Пожаровзрывобезопасность. – 2003. – № 1. – С. 24–38.

29. Осипов, А.Л. Моделирование концентрационных пределов на основе нейронных сетей [Текст] / А.Л. Осипов, В.П. Трушина, И.О. Павлик // International Journal of Advanced Studies. – 2016. – № 2. – С. 67–78. DOI: 10.12731/2227-930X-2016-2-67-78

30. Чуйков, А.М. Температура вспышки и энергия Гельмгольца для веществ гомологических рядов *n*-алкилпропаноатов и *n*-алкилбутаноатов [Текст] / А.М. Чуйков, Ю.К. Сунцов, Ю.Н. Сорокина, В.И. Лукьяненко, А.Н. Шуткин // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2017. – № 3. – С. 45–49.

31. Christian, J.R. Prediction of flammability limits for ethanol-air blends by the Kriging regression model and response surfaces / J.R. Christian, I. Elkin, C. Juan et al. // Fuel, 2017, vol. 210, pp. 410–424. DOI: 10.1016/j.fuel.2017.08.089

32. Keshavarz, M.H. A simple and reliable method for prediction of flash point of alcohols based on their elemental composition and structural parameters / M.H. Keshavarz, M. Jafari, M. Kamalvand et al. // Process Safety and Environmental Protection, 2016, vol. 102, pp. 1–8. DOI: 10.1016/j.psep.2016.01.018

33. Mingqiang, Wu A new model based on adiabatic flame temperature for evaluation of the upper flammable limit of alkane-air-CO₂ mixtures / Mingqiang Wu,

Gegun Shu, Rui Chen et al. // Journal of Hazardous Materials, 2018, vol. 344, pp. 450–457. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2017.10.030

34. Zhao, F. *Calculated flame temperature (CFT) modeling of fuel mixture lower flammability limits / F. Zhao, W.J. Rogers, M.S. Mannan // Journal of Hazardous Materials, 2010, vol. 174, pp. 416–423. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2009.09.069*

35. Keshavarz, M.H. *New and reliable model for prediction of autoignition temperature of organic compounds containing energetic groups / M.H. Keshavarz, M. Jafari, K. Esmailpour, M. Samiee // Process Safety and Environmental Protection, 2018, vol. 113, pp. 491–497. DOI: 10.1016/j.psep.2017.12.001*

36. Ngoc Lan Mai. *Quantitative prediction of lipase reaction in ionic liquids by QSAR using COSMO-RS molecular descriptors / Ngoc Lan Mai, Yoon-Mo Koo // Biochemical Engineering Journal, 2014, vol. 87, pp. 33–40. DOI: 10.1016/j.bej.2014.03.010.*

37. Jiao, L. *QSPR study on the flash point of organic binary mixtures by using electrotopological state index / L. Jiao, X. Zhang, Y. Qin, X. Wang, H. Li // Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems, 2016, vol. 156, pp. 211–216. DOI: 10.1016/j.chemolab.2016.05.023*

38. Zhao, F. *Experimental measurement and numerical analysis of binary hydrocarbon mixture flammability limits / F. Zhao, W.J. Rogers, M.S. Mannan // Process Safety and Environmental Protection, 2009, vol. 87, pp. 94–104. DOI: 10.1016/j.psep.2008.06.003*

39. Chen R., Axelbaum R.L. *Scalar dissipation rate at extinction and the effects of oxygen -enriched combustion//Combustion and Flame, 2005, vol. 142, No. 1, pp. 62–71.*

40. Азатян, В.В. Аналоги правила Ле-Шателье для оценки концентрационных пределов распространения пламени и минимальных огнетушащих концентраций [Текст] / В.В. Азатян, Ю.Н. Шебеко, А.Ю. Шебеко и др. // Пожарная безопасность. – 2007. – № 3. – С. 12–21.

41. Есина, З.Н. Прогнозирование температуры вспышки бинарных смесей по данным о коэффициентах активности [Текст] / З.Н. Есина, В.В. Мурашкин,

М.Р. Корчуганова // Вестник Томского государственного университета: математика и механика. – 2013. – № 2 (22). – С. 67–78.

42. Зельдович, Я.Б. Теория теплового распространения пламени [Текст] / Я.Б. Зельдович, Д.А. Франк-Каменецкий // Журнал физической химии. – 1938. – Т. 12. – № 1. – С. 100–105.

43. Зельдович, Я.Б. Кинетика химических реакций в пламенах [Текст] / Я.Б. Зельдович, Н.Н. Семёнов // Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 1940. – Т. 10. – № 9, 10. – С. 1116–1133.

44. Семёнов, Н.Н. Тепловая теория горения и взрывов [Текст] / Н.Н. Семёнов // Успехи физических наук. – 1940. – Т. 24. – № 8. – С. 433–486.

45. *Karman, Th. Fundamental approach to the laws of flame propagation / Th. Karman, S.S. Penner // Selected Combustion Problems / Fundamentals and Aeronautical Applications, AGARD, London: Butterworths, pp. 5–41.*

46. Семенов, Н.Н. Цепные реакции [Текст] / Н.Н. Семенов. – М.: Наука, 1986. – 535 с.

47. Кондратьев, В.Н. Кинетика химических газовых реакций [Текст] / В.Н. Кондратьев. – М.: Изд-во АН СССР, 1958. – 688 с.

48. Кондратьев, В.Н. Константы скорости газофазных реакций [Текст]: справочник / В.Н. Кондратьев. – М.: Наука, 1970. – 350 с.

49. Грохотов, М.А. Математическая модель взрывоопасных режимов при фотохлорировании метана [Текст] / М.А. Грохотов, И.Р. Бегишев, А.К. Беликов, А.А. Комаров // Технологии техносферной безопасности. – 2016. – № 4. – С. 1 – 8.

50. Грохотов, М.А. Кинетический подход при расчёте параметров пожаровзрывоопасности газовых смесей метана с хлором [Текст] / М.А. Грохотов, И.Р. Бегишев, А.К. Беликов, А.А. Комаров // Пожаровзрывобезопасность. – 2018. – № 2 – 3. – С. 27 – 36. DOI: 10.18322/PVB.2018.27.02-03.27-36

51. Мищенко, К.П. Краткий справочник физико-химических величин некоторых неорганических и органических соединений [Текст] / К.П. Мищенко, А.А. Равделя. – Л.: Химия, 1967. – 200 с.

52. Грохотов, М.А. Апробация расчётной модели фототеплового воспламенения на экспериментальных данных [Текст] / М.А. Грохотов, И.Р. Бегишев, А.К. Беликов, А.А. Комаров // Пожары и ЧС. – 2017. – №3. – С.75–77

53. Варгафтик, Н.Б. Справочник по теплопроводности жидкостей и газов [Текст] / Н.Б. Варгафтик, Л.П.Филиппов, А.А. Тарзиманов, Е.Е. Тоцкий. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 352 с.

54. Chemistry WebBook [Электронный ресурс] // NIST: сайт. – Режим доступа: <http://webbook.nist.gov/chemistry/> (дата обращения 13.05.2017).

55. Розловский, А.И. Интегральное излучение пламени хлорсодержащих смесей [Текст] / А.И. Розловский, А.В. Стеблев, Ю.Е. Фролов // Доклады АН СССР. – 1978. – Т. 241. – № 3. – С. 631–634.

56. Мальцева, А.С. Прямое радиационное нагревание при интенсивной хемилюминесценции / А.С. Мальцева, А.В. Стеблев, Ю.Е. Фролов, А.И. Розловский // Доклады АН СССР. – 1981. – Т. 258. – № 2. – С. 406–410.

57. Разностные схемы (введение в теорию) [Текст]: учебное пособие / С.К. Годунов, В.С. Рябенский. – М.: Наука, 1973. – 400 с.

58. Уравнения математической физики [Текст]: учебное пособие / А.Н. Тихонов, А.А. Самарский. – М.: Наука, 1966. – 724 с.

59. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2016662831. Российская Федерация. Математическая модель фототеплового воспламенения / М.А. Грохотов, И.Р. Бегишев, А.К. Беликов, А.А. Комаров; правообладатели М.А. Грохотов, И.Р. Бегишев, А.К. Беликов, А.А. Комаров; заявл. 03.10.2016; зарегистр. 23.11.2016; опубл. 20.12.2016, Бюл. № 1. – 1 с.

60. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2017662988. Российская Федерация. Расчётный метод определения показателей пожаровзрывоопасности газовых смесей / М.А. Грохотов, И.Р. Бегишев, А.К. Беликов, А.А. Комаров; правообладатели М.А. Грохотов, И.Р.

Бегишев, А.К. Беликов, А.А. Комаров; заявл. 04.10.2017; зарегистр. 22.11.2017; опубл. 22.11.2017, Бюл. № 1. – 1 с.

61. ГОСТ 8.585–2001. Термопары. Номинальные статические характеристики преобразования [Электронный ресурс]: государственный стандарт // Гарант: инф.-прав. об-ние. – Эл. дан. – М., 2017. – Доступ из лок-ной сети б-ки Академии ГПС МЧС России (дата обращения 22.09.2017)

62. Термогазодинамика пожаров в помещениях [Текст] / М.В. Астапенко, Ю.А. Кошмаров, И.С. Молчадский, А.Н. Шевляков / Под ред. Ю.А. Кошмарова. – М.: Стройиздат, 1988. – 448 с.

63. Манометры и вакуумметры деформационные образцовые с условными шкалами типов МО и ВО [Электронный ресурс]: паспорт 3.9060.303 ПС // ООО «Приборика»: сайт. – Режим доступа: <https://priborika.ru/omishop/01/0101/010108/mo015.pdf> (дата обращения 22.09.2017)

64. Грохотов, М.А. Параметры пожаровзрывоопасности хлорпроизводных метана в смеси с хлором в модели фототеплового воспламенения [Текст] / М.А. Грохотов, И.Р. Бегишев, А.К. Беликов, А.А. Комаров // Пожарная безопасность. – 2017. – № 3. – С. 43 – 49.

65. Беликов, А.К. Воспламенение смесей хлорметана с хлором под действием ультрафиолетового излучения [Текст] / А.К. Беликов, И.С. Никитин, И.Р. Бегишев // Пожаровзрывобезопасность. – 2010. – № 10. – С. 9–12.

66. Бегишев, И.Р. Формирование очага воспламенения в смеси $\text{CH}_3\text{Cl} + \text{Cl}_2$ при действии УФ-света [Текст] / И.Р. Бегишев, А.К. Беликов, П.В. Комраков, И.С. Никитин // Журнал физической химии. – 2016. – № 7. – С. 993–999.

67. Комраков, П.В. Взрывобезопасные условия фотохлорирования дихлорметана в газовой фазе / П.В. Комраков, А.К. Беликов, И.Р. Бегишев // симпозиум: XII Симпозиум по горению и взрыву. Химическая физика процессов горения и взрыва. – Черноголовка, 2000. – Т. 3. – С. 48–49.

68. Комраков, П.В. Особенности воспламенения и распространения пламени в газовых смесях дихлорметана с хлором при зажигании ультрафиолетовым светом [Электронный ресурс] / И.Р. Бегишев, А.К. Беликов, П.В. Комраков //

Пожарное дело: Электронный журнал. – 2007. – Режим доступа: http://pojar01.ru/11/PROCESS_GOR/ST/ST_KOMRAKOV_/text.html

69. Беликов, А.К. Ингибирующий эффект при флегматизации трихлорметаном смесей хлористого метила и хлора при их фотовоспламенении [Текст] / А.К. Беликов, И.С. Никитин, И.Р. Бегишев // Химическая физика. – 2011. – № 10. – С. 1–4.

70. Никитин, И.С. Флегматизация четырёххлористым углеродом смесей хлорметана и хлора при их фотовоспламенении [Текст] / И.С. Никитин, А.К. Беликов, И.Р. Бегишев // Пожаровзрывобезопасность. – 2015. – № 2. – С. 32–35.

71. Тимофеев, А.Ф. Техника безопасности при хранении, транспортировании и применении хлора [Текст] / А.Ф. Тимофеев, А.Ф. Мазанко, Б.Ю. Ягуд и др. – М.: Химия, 1990. – 336 с.

72. Зельдович, Я.Б. Теория детонации [Текст] / Я.Б. Зельдович, А.С. Компанеец. – М.: Гос. изд-во технико-теоретической литературы, 1955. – 268 с.

73. Лойцянский, Л.Г. Механика жидкости и газа [Текст] / Л.Г. Лойцянский. – М.: Наука, 1970. – 904 с.

74. Варнатц, Ю. Горение. Физические и химические аспекты, моделирование, эксперименты, образование загрязняющих веществ [Текст] / Ю. Варнатц, У. Маас, Р. Диббл / Пер. с англ. Г.Л. Агафонова; под ред. П.А. Власова. – М.: Физматлит, 2003. – 352 с.

75. Грохотов, М.А. Расчёт СРФП пламени при дефлаграционном взрыве [Текст] / М.А. Грохотов [и др.] // Материалы 6-й Международной науч.-практ. конф.: Пожаротушение: проблемы, технологии, инновации. – М.: Академия ГПС МЧС России, 2018. – С. 301–303.

76. Зельдович, Я.Б. Теория горения и детонации газов [Текст] / Я.Б. Зельдович. – М.: Изд. АН СССР, 1944. – 71 с.

77. Щелкин, К.И. Неустойчивость горения и детонации газов [Текст] / К.И. Щелкин // Успехи физических наук. – 1967. – Т. 87 (вып. 2). – С. 273–302.

78. Зельдович, Я.Б. О распределении давления и скорости в продуктах детонационного взрыва, в частности, при сферическом распространении

детонационной волны [Текст] / Я.Б. Зельдович // Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 1942. – Т. 12 (вып. 9). – С. 389–406.

79. *Teodorczyk, A. The structure of fast turbulent flames in very rough, obstacle-filled channels / A. Teodorczyk, J.H.S. Lee, R. Knystautas // International Symposium on Combustion, 1991, vol. 23, No. 1, pp. 735–741.*

80. *Wolanski P. Detonative propulsion / P. Wolanski // Proceedings of the Combustion Institute, 2013, vol. 34, No. 1, pp. 125–158.*

81. Азатян, В.В. Проблемы горения, взрыва и детонации газов в теории неизотермических цепных процессов [Текст] / В.В. Азатян // Журнал физической химии. – 2014. – Т. 88. – № 5. – С. 759–771.

82. Азатян, В.В. Цепные реакции в процессах горения, взрыва и детонации газов [Текст] / В.В. Азатян. – Черноголовка: Изд-во ИПХФ РАН, 2017. – 448 с.

83. Семёнов, В.Н. Физика быстропротекающих процессов. Горение и детонация газовых смесей [Текст] / В.Н. Семёнов. – М.: Институт проблем безопасного развития атомной энергии, 2006. – 66 с.

84. Войцеховский, Б.В. Структура фронта детонации в газах [Текст] / Б.В. Войцеховский, В.В. Митрафанов, М.Е. Топчиян. – Новосибирск: Изд-во СО АН СССР, 1963.

85. Гвоздева, Л.Г. Преломление детонационных волн при падении на границу раздела газовых смесей [Текст] / Л.Г. Гвоздева // ЖТФ, 1961. – Т. 31. – № 6. – С. 731–739.

86. Гвоздева, Л.Г. Экспериментальное исследование дифракции детонационных волн в стехиометрической смеси метана с кислородом [Текст] / Л.Г. Гвоздева // ЖПМТФ. – 1961. – № 5. – С. 53–56.

87. *Bredley D. Mathematical solutions for explosions in spherical vessels / D. Bredley, A. Mitcheson // Combustion and Flame, 1976, vol. 26, No. 2, pp. 201–207.*

88. *Berman, M. A critical review of recent large scale experiments on hydrogen air detonations / M. Berman // Nuclear Science and Engineering, 1986, vol. 93, pp. 321–347.*

89. Макеев, В.И. Горение и переход к детонации газовых смесей в пространстве с частичным загромождением / В.И. Макеев, А.А. Пономарев, В.В. Строганов, В.Л. Карпов // Пожаровзрывобезопасность. – 1993. - № 2. – С. 3–6.

90. Макеев, В.И. Экспериментальное исследование ускорения пламени в свободных сферических объёмах [Текст] / В.И. Макеев, В.В. Строганов, А.П. Чугуев, Ю.Н. Чернушкин // В кн. Горение и проблемы тушения пожаров. – М.: ВНИИПО, 1981. – С. 17–20.

91. Cook G. Flixborough petrochemical plant [Электронный ресурс] / G. Cook. – Режим доступа: <http://www.cookeonfire.com/pdfs/Flixborough.pdf> (дата обращения 15.03.2018)

92. Последний день завода в Фликсборо [Электронный ресурс] / И. Сорокина // Новые химические технологии: аналитический портал. – Режим доступа: http://www.newchemistry.ru/printletter.php?n_id=302 (дата обращения 15.03.2018)

93. Маршалл, В. Основные опасности химических производств [Текст] / В. Маршалл. – М.: Мир, 1989. – 672 с.

94. Пособие по обследованию и проектированию зданий и сооружений, подверженных воздействию взрывных нагрузок [Текст]. – М.: ЦНИИПромзданий, 2000. – 122 с.

95. Бузаев, Е.В. Разработка методов прогнозирования параметров взрывоопасных зон при аварийных выбросах горючих веществ [Текст]: дис. ... канд. техн. наук: 05.26.03 / Бузаев Евгений Владимирович. – М., 2015. – 124 с.

96. Комаров, А.А. Особенности гидродинамических расчётов при проведении технической экспертизы аварийного взрыва [Текст] / А.А. Комаров, Д.А. Корольченко, Н.В. Громов // Пожаровзрывобезопасность. – 2017. – Т.26. – № 10. – С. 36–42.

Приложение А
(обязательное)

АКТЫ ВНЕДРЕНИЯ

«УТВЕРЖДАЮ»

Начальник ФГБУ
ВНИИПО МЧС России
кандидат технических наук



Д.М. Гордиенко

«13» март 2018 г.

Акт

о внедрении результатов исследований, полученных при выполнении диссертационной работы Грохотова Михаила Андреевича на тему «Методика прогнозирования скорости распространения фронта пламени при сгорании газозоудушного облака в открытом пространстве»

Результаты диссертационной работы были использованы в Федеральном государственном бюджетном учреждении «Всероссийский ордена «Знак Почета» научно-исследовательский институт противопожарной обороны» при разработке свода правил СП 231.1311500.2015 «Обустройство нефтяных и газовых месторождений. Требования пожарной безопасности».

Заместитель начальника института

А.Ю. Лагозин

Главный научный сотрудник
доктор технических наук,
профессор

Ю.Н. Шебеко



АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО «ОМЕГА»

ул. Академика Королёва, д. 6, корп. 1, г. Москва, Россия, 129515; тел. (499)799-84-35, факс: (499) 799-83-50;

e-mail: info@omg.transneft.ru; ИНН 7743757192; КПП 771701001, ОКПО 63676632; ОГРН 1097746627230;

УТВЕРЖДАЮ
Заместитель генерального
директора –
главный инженер
АО «ОМЕГА»



Э.Р. Ахмедов
февраль 2018

Акт

О внедрение результатов исследований, полученных при выполнении диссертационной работы Грохотова Михаила Андреевича – «Методика прогнозирования скорости распространения фронта пламени при сгорании газозоудного облака в открытом пространстве»

Комиссия в составе:

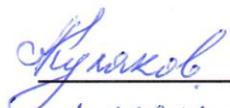
Э.Р. Ахмедов - заместитель генерального директора – главный инженер, председатель комиссии

А.Т. Кулаков - начальник службы по работе с научно-исследовательскими организациями

А.В. Иванников - начальник группы разработки и внедрения интеллектуальных систем

составила настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы были использованы для определения безопасных расстояний от оборудования оптоволоконной системы мониторинга трубопроводов (ОСМТ) «ОМЕГА» до трубопроводов, технологического оборудования и других коммуникаций, где возможно образование горючих газозоудных смесей.

Члены комиссии:

 /А.Т. Кулаков

 /А.В. Иванников

УПРАВЛЕНИЕ ПО РАЗВИТИЮ
НОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ
(цех №112)

АКТ

от 27.04.2018 № 74-13/153РТД

УТВЕРЖДАЮ

Директор

Д.А. Крылов



Об использовании результатов
НИР

Разработанная в рамках диссертационного исследования Грохотова Михаила Андреевича математическая модель фототеплового воспламенения смесей хлора с метаном и его хлорпроизводными была использована на нашем предприятии для установления предельных параметров хлорирования метана с целью обеспечения пожаровзрывобезопасного режима работы реактора и повышения выхода целевого продукта.

Начальник управления
по развитию новых технологий

Д.А. Шабалин

Шабалин IP 92-25
ДШ 2 27.04.2018

«УТВЕРЖДАЮ»

Заместитель начальника Академии
ГПС МЧС России по научной работе

М.В. Алешков

2018 г.



Акт

о внедрение результатов исследований, полученных при выполнении диссертационной работы Грохотова Михаила Андреевича – «Методика прогнозирования скорости распространения фронта пламени при сгорании газоздушного облака в атмосфере» в учебный процесс кафедры «Процессы горения» и в научную деятельность АГПС МЧС России

Комиссия в составе председателя: начальника кафедры процессов горения, к.т.н., полковника внутренней службы Комракова П.В., членов комиссии: профессора кафедры процессов горения, д.т.н., профессора Бегишева И.Р., доцента кафедры процессов горения, к.т.н., Андросова А.С. составили настоящий акт в том, что результаты диссертационной работы Грохотова М.А. были использованы:

- при выполнении научно-исследовательской работы по плану научной работы Академии ГПС МЧС России на 2016 г., п.112 на тему: «Теоретическое исследование воспламенения в газовых смесях, реагирующих под действием УФ-излучения»;

- в учебном процессе при разработке фондовой лекции «Теория теплового взрыва» для изучения дисциплины «Теория горения и взрыва» на очном и заочном факультетах Академии ГПС МЧС России.

Председатель комиссии:

Начальник кафедры процессов горения
к.т.н., полковник внутренней службы

П.В. Комраков

Члены комиссии:

Профессор кафедры процессов горения
д.т.н., профессор

И.Р. Бегишев

Доцент кафедры процессов горения
к.т.н.

А.С. Андросов

Приложение Б
(обязательное)

КОД ПРОГРАММЫ

**«РАСЧЁТНЫЙ МЕТОД
ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПОЖАРОВЗРЫВООПАСНОСТИ ГАЗОВЫХ
СМЕСЕЙ.**

```

function varargout = menu(varargin)
% MENU MATLAB code for menu.fig
%     MENU, by itself, creates a new MENU or raises the existing
%     singleton*.
%
%     H = MENU returns the handle to a new MENU or the handle to
%     the existing singleton*.
%
%     MENU('CALLBACK',hObject,eventData,handles,...) calls the local
%     function named CALLBACK in MENU.M with the given input arguments.
%
%     MENU('Property','Value',...) creates a new MENU or raises the
%     existing singleton*. Starting from the left, property value pairs
are
%     applied to the GUI before menu_OpeningFcn gets called. An
%     unrecognized property name or invalid value makes property
application
%     stop. All inputs are passed to menu_OpeningFcn via varargin.
%
%     *See GUI Options on GUIDE's Tools menu. Choose "GUI allows only one
%     instance to run (singleton)".
%
% See also: GUIDE, GUIDATA, GUIHANDLES

% Edit the above text to modify the response to help menu

% Last Modified by GUIDE v2.5 09-Jul-2017 22:47:37

% Begin initialization code - DO NOT EDIT
gui_Singleton = 1;
gui_State = struct('gui_Name',       mfilename, ...
                  'gui_Singleton',  gui_Singleton, ...
                  'gui_OpeningFcn', @menu_OpeningFcn, ...
                  'gui_OutputFcn',  @menu_OutputFcn, ...
                  'gui_LayoutFcn',  [] , ...
                  'gui_Callback',   []);
if nargin && ischar(varargin{1})
    gui_State.gui_Callback = str2func(varargin{1});
end

if nargout
    [varargout{1:nargout}] = gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
else
    gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
end
% End initialization code - DO NOT EDIT

% --- Executes just before menu is made visible.
function menu_OpeningFcn(hObject, eventdata, handles, varargin)
set(handles.pushbutton3, 'Enable', 'off') %делает кнопку не доступной
set(handles.pushbutton4, 'Enable', 'off') %делает кнопку не доступной
% This function has no output args, see OutputFcn.
% hObject     handle to figure
% eventdata   reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles     structure with handles and user data (see GUIDATA)
% varargin    command line arguments to menu (see VARARGIN)

```

```

% Choose default command line output for menu
handles.output = hObject;

% Update handles structure
guidata(hObject, handles);

% UIWAIT makes menu wait for user response (see UIRESUME)
% uiwait(handles.figure1);

% --- Outputs from this function are returned to the command line.
function varargout = menu_OutputFcn(hObject, eventdata, handles)
% varargout cell array for returning output args (see VARARGOUT);
% hObject handle to figure
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Get default command line output from handles structure
varargout{1} = handles.output;

% --- Executes on button press in pushbutton1.
function pushbutton1_Callback(hObject, eventdata, handles)
set(handles.pushbutton1, 'Enable', 'off') %делает кнопку не доступной
set(handles.pushbutton2, 'Enable', 'on') %делает кнопку доступной
set(handles.pushbutton3, 'Enable', 'off') %делает кнопку не доступной
set(handles.pushbutton4, 'Enable', 'off') %делает кнопку не доступной
% hObject handle to pushbutton1 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)
clear all
cla

% --- Executes on button press in pushbutton2.
function pushbutton2_Callback(hObject, eventdata, handles)
set(handles.pushbutton2, 'Enable', 'off') %делает кнопку не доступной Старт
set(handles.pushbutton1, 'Enable', 'on') %делает кнопку доступной Стоп
% hObject handle to pushbutton2 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)
global e1 p kt Et R k5
global k11 k12 k13 k14 EE11 EE12
global k21 k22 k23 k24 EE21 EE22
global k31 k32 k33 k34 EE31 EE32
global k41 k42 k43 k44 EE41 EE42
global Q1 Q2 Q3 Q4
k11=0.2*25118864.32; k12=0.2*7943282.347; k13=36307805.48; k14=398107170.6;
%%m^3/(mol*s) метан
k21=33113112.15; k22=3981071.706; k23=3981071.706; k24=251188643.2;
%%m^3/(mol*s) хлорметан
k31=26915348.04; k32=1000000; k33=2511886.432; k34=223872113.9;
%%m^3/(mol*s) дихлорметан
k41=6918309.709; k42=549540.8739; k43=50118.72336; k44=63095734.45;
%%m^3/(mol*s) трихлорметан
k5=19952.62315; %%m^6/(mol^2*s)
EE11=16035.44; EE12=9629.64; EE21=13816.44; EE22=12560.4; %% Дж/моль
EE31=12560.4; EE32=16747.2; EE41=13983.912; EE42=20934; %%% Дж/моль
e1=2; p=41.6; kt=10^8; Et=196648; R=8.314;
Q1=98920; Q2=105060; Q3=99270; Q4=92000;

```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Построение сетки по X %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
npx=60;% число ячеек по x
x1=0;
x2=0.04; %in m
dx=(x2-x1)/npx; %in m шаг по x
x=linspace(x1+dx/2,x2-dx/2,npx);% массив иксов, linspace разбивает на
равные части

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% ГРАНИЧНЫЕ УСЛОВИЯ X %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% 0 - свободная, 1 - жесткая, 2 - задается
%левая
jxgrl=ones(size(x)); % 1 - жесткая,
% jxgrl=zeros(size(x)); % 0 - свободная,
% jxgrl(10:30)=0;
%jxgrl=293*ones(size(x));

%правая
jxgrp=ones(size(x));
% jxgrp=zeros(size(x));
%jxgrp=293*ones(size(x));

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Построение сетки по Y %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

npy=27;
y1=0;
y2=0.018;
dy=(y2-y1)/npy;
y=linspace(y1+dy/2,y2-dy/2,npy);

IIIII0=zeros(size(y));

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
if (dx~=dy)
    msgbox('НЕ РАВНОМЕРНАЯ СЕТКА','Предупреждение','warn')
end
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% ГРАНИЧНЫЕ УСЛОВИЯ Y %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%левая
iygrl=ones(size(y));
% iygrl=zeros(size(y)); % 0 - свободная,
% iygrl=293*ones(size(y));

%правая
iygrp=ones(size(y));
% iygrp=zeros(size(y));
% iygrp=293*ones(size(y));

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% ИСХОДНЫЙ ПРОФИЛЬ %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
[X,Y]=meshgrid(x,y);
T=ones(size(X));
Tpr=zeros(size(X)); %температура в К
TprPr=zeros(size(X)); %температура в К
CLOR=zeros(size(X)); %концентрация хлора в моль/м3

```

```

CH4=zeros(size(X));           %концентрация метана
WW1=zeros(size(X));
WW11=zeros(size(X));
CH3Cl=zeros(size(X));        %концентрация хлорметана
WW2=zeros(size(X));
WW22=zeros(size(X));
CH2Cl2=zeros(size(X));       %концентрация дихлорметана
WW3=zeros(size(X));
WW33=zeros(size(X));
CHCl3=zeros(size(X));        %концентрация трихлорметана
WW4=zeros(size(X));
WW44=zeros(size(X));
CCl4=zeros(size(X));         %концентрация тетрахлорметана
WW5=zeros(size(X));
Cl=zeros(size(X));           %концентрация радикалов хлора
Dx=zeros(size(X));
nn=zeros(size(X));
Cv1=zeros(size(X));
Cv2=zeros(size(X));
Cv3=zeros(size(X));
Cv4=zeros(size(X));
Cv5=zeros(size(X));
Cv6=zeros(size(X));
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
t=str2num(get(handles.edit8,'String')); %время расчёта, сек
dt=str2num(get(handles.edit10,'String')); %шаг по времени, сек
I0=str2num(get(handles.edit6,'String')); %%%% интенсивность света
M=41.6; %количество молей смеси
SS=t/dt;
nstep=fix(SS); %%%количество шагов
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%Концентрация веществ в смеси (горючего) задаётся в процентах%%
ConCH4=str2num(get(handles.edit1,'String')); %метан
ConCH3Cl=str2num(get(handles.edit2,'String')); %хлорметан
ConCH2Cl2=str2num(get(handles.edit3,'String')); %дихлорметан
ConCHCl3=str2num(get(handles.edit4,'String')); %трихлорметан
ConCCl4=str2num(get(handles.edit5,'String')); %четырёххлористый уг
T0=str2num(get(handles.edit7,'String')); %начальная температура смеси, К
RashGaz=1; %расширение газа 1 - ДА, 0 - НЕТ
blah=get(handles.uipanel3,'SelectedObject');
whatever=get(blah,'Tag');
if(whatever == 'radiobutton1')
IIIII0(1:npy)=1; %включение УФ-света 1 - ДА, 0 - НЕТ
else
IIIII0(1:npy)=0; %включение УФ-света 1 - ДА, 0 - НЕТ
end
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
PPPP=(100-ConCH4-ConCH3Cl-ConCH2Cl2-ConCHCl3-ConCCl4); %хлор в процентах
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
CH40=M*ConCH4/100;
CH3Cl0=M*ConCH3Cl/100;
CH2Cl20=M*ConCH2Cl2/100;
CHCl30=M*ConCHCl3/100;
CCl40=M*ConCCl4/100;
PromCon=(CH40+CH3Cl0+CH2Cl20+CHCl30+CCl40);
CLOR0=M-PromCon;
T=T0*T;

```

```

                for j=1:npx      %%% X
                    for i=1:npy  %%% Y
CLOR(i,j)=CLOR0;      % начальные условия
CH4(i,j)=CH40;
CH3Cl(i,j)=CH3Cl0;
CH2Cl2(i,j)=CH2Cl20;
CHCl3(i,j)=CHCl30;
CCl4(i,j)=CCl40;
                    end
                end
ddtend=dt*nstep;
nit=0;
ttt=zeros(1,nstep);
%TTpoint1=ttt;
TTpoint2=ttt;
%TTpoint3=ttt;
TTT=ttt;
CLORR=ttt; % хлор среднеобъемный
WWW1=ttt; %метан
WWW2=ttt; %хлорметан
WWW3=ttt; %дихлорметан
WWW4=ttt; %трихлорметан
WWW5=ttt; %тетрахлорметан
CLORRR=ttt; %хлор в точке
Dxx=ttt;
nnn=ttt;
%%первая точка%%
%jxpoint1=25;
%iypoint1=20;
%%вторая точка%%
jxpoint2=30;
iypoint2=1;
%%третья точка%%
%jxpoint3=76;
%iypoint3=20;
nprint=120; %% шаг вывода графика
ddtnprint=dt*nprint;

        for it=1:nstep      %%%
nit=nit+1;
nnout=nit-nprint*fix(nit/nprint);
ttt(it)=it*dt;
%TTpoint1(it)= T(iypoint1,jxpoint1);
TTpoint2(it)= T(iypoint2,jxpoint2);
%TTpoint3(it)= T(iypoint3,jxpoint3);
WWW1(it)=CH4(iypoint2,jxpoint2); %концентрация метана в точке
WWW2(it)=CH3Cl(iypoint2,jxpoint2); %концентрация хлорметана в точке
WWW3(it)=CH2Cl2(iypoint2,jxpoint2); %концентрация дихлорметана в точке
WWW4(it)=CHCl3(iypoint2,jxpoint2); %концентрация трихлорметана в точке
WWW5(it)=CCl4(iypoint2,jxpoint2); %концентрация тетрахлорметана в точке
CLORRR(it)=CLOR(iypoint2,jxpoint2); %концентрация хлора в точке
Dxx(it)=Dx(iypoint2,jxpoint2);
nnn(it)=100*nn(iypoint2,jxpoint2);
%%ТЕМПЕРАТУРА НА ГРАНИЦЕ%%
TTT0xpr=str2num (get(handles.edit9, 'String'));
TTT0xlev=str2num (get(handles.edit9, 'String'));

```

```

TTT0ypr=str2num (get (handles.edit9, 'String'));
TTT0ylev=str2num (get (handles.edit9, 'String'));
bbb=sum(sum(T))/npx/npу; %%% расчёт среднеобъемной температуры
CCv=((35.6-R)*ConCH4+(40.7-R)*ConCH3Cl+(50.8-R)*ConCH2Cl2+(65.3-
R)*ConCHCl3+(82.6-R)*ConCCl4+(33.9-R)*PPPP)/100;%%теплоемкость смеси в
начальный момент

for j=1:npx %%% X
for i=1:npу %%% Y
%%%%%%%%%%%%%% BS 11111 N
j2=j+1;
                if(j==npx)
                    if (iygrp(i)==0)
POTX2=0; %правая граница по X %%
                    else
POTX2=TTT0xpr-T(i,npx);
                    end
                else
POTX2=T(i,j+1)-T(i,j);
                end

j1=j-1;
                if (j==1)
                    if (iygrl(i)==0)
POTX1=0; %левая граница по X%%
                    else
POTX1=T(i,1)-TTT0xlev;
                    end
                else
POTX1=T(i,j)-T(i,j-1);
                end

                %%%%%%%%%%%%%%%

i2=i+1;
                if (i==npу)
                    if (jxgrl(j)==0)
POTY2=0; %левая граница по Y%%
                    else
POTY2=(TTT0ylev-T(npу,j));
                    end
                else
POTY2=(T(i+1,j)-T(i,j));
                end

i1=i-1;
                if (i==1)
                    if (jxgrp(j)==0)
POTY1=0; %правая граница по Y%%
                    else
POTY1=(T(1,j)-TTT0ypr);
                    end
                else
POTY1=(T(i,j)-T(i-1,j));
                end

                %%%%%%%%%%%МЕТАН%%%%%%%%%%
                if (CH40>0)

```

```

    if (T(i,j)<=1300)
AA1=-0.703029; BB1=108.4773; CC1=-42.52157; DD1=5.862788; EE1=0.678565;
    else
AA1=85.81217; BB1=11.26467; CC1=-2.114146; DD1=0.138190; EE1=-26.42221;
    end
Cv1(i,j)=AA1+BB1*(T(i,j)/1000)+CC1*(T(i,j)/1000)^2+DD1*(T(i,j)/1000)^3+EE1/
(T(i,j)/1000)^2-R; %теплоёмкость метана Дж/(моль*К)
        else
            Cv1(i,j)=0;
        end

        %%%%%%%%%ХЛОРМЕТАН%%%%%%%%
        if (CH3Cl>0)
            if (T(i,j)<=1200)
AA2=3.524690; BB2=136.9277; CC2=-82.14196; DD2=20.22797; EE2=0.278032;
            else
AA2=88.66691; BB2=10.06834; CC2=-1.928737; DD2=0.128191; EE2=-19.76840;
            end
Cv2(i,j)=AA2+BB2*(T(i,j)/1000)+CC2*(T(i,j)/1000)^2+DD2*(T(i,j)/1000)^3+EE2/
(T(i,j)/1000)^2-R; %теплоёмкость хлорметана Дж/(моль*К)
            else
                Cv2(i,j)=0;
            end

            %%%%%%%%%ДИХЛОРМЕТАН%%%%%%%%
            if (CH2Cl2>0)
                if (T(i,j)<=1200)
AA3=19.17351; BB3=136.8444; CC3=-95.12993; DD3=26.03105; EE3=-0.119405;
                else
AA3=95.12993; BB3=6.721722; CC3=-1.288196; DD3=0.085646; EE3=-14.93885;
                end
Cv3(i,j)=AA3+BB3*(T(i,j)/1000)+CC3*(T(i,j)/1000)^2+DD3*(T(i,j)/1000)^3+EE3/
(T(i,j)/1000)^2-R; %теплоёмкость дихлорметана Дж/(моль*К)
                else
                    Cv3(i,j)=0;
                end

                %%%%%%%%%ТРИХЛОРМЕТАН%%%%%%%%
                if (CHCl3>0)
                    if (T(i,j)<=1200)
AA4=44.24706; BB4=114.6734; CC4=-88.81837; DD4=25.89992; EE4=-0.522808;
                    else
AA4=101.4762; BB4=3.429756; CC4=-0.657348; DD4=0.043707; EE4=-9.348019;
                    end
Cv4(i,j)=AA4+BB4*(T(i,j)/1000)+CC4*(T(i,j)/1000)^2+DD4*(T(i,j)/1000)^3+EE4/
(T(i,j)/1000)^2-R; %теплоёмкость трихлорметана Дж/(моль*К)
                    else
                        Cv4(i,j)=0;
                    end

                    %%%%%%%%%ТЕТРАХЛОРМЕТАН%%%%%%%%
                    if (CCl4>0)
AA5=103.1134; BB5=4.188644; CC5=-1.126475; DD5=0.095677; EE5=-1.919624;
Cv5(i,j)=AA5+BB5*(T(i,j)/1000)+CC5*(T(i,j)/1000)^2+DD5*(T(i,j)/1000)^3+EE5/
(T(i,j)/1000)^2-R; %теплоёмкость тетрахлорметана Дж/(моль*К)
                    else
                        Cv5(i,j)=0;
                    end
                end
            end
        end
    end

```

```

end

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
if (CLOR0>0)
if (T(i,j)<=1000)
AA6=33.0506; BB6=12.2294; CC6=-12.0651; DD6=4.38533; EE6=-0.159494;
else
AA6=42.6773; BB6=-5.00957; CC6=1.904621; DD6=-0.165641; EE6=-2.09848;
end
Cv6(i,j)=AA6+BB6*(T(i,j)/1000)+CC6*(T(i,j)/1000)^2+DD6*(T(i,j)/1000)^3+EE6/
(T(i,j)/1000)^2-R; %теплоёмкость метана Дж/(моль*К)
else
Cv6(i,j)=0;
end

Dx(i,j)=(3.22*10^-2*(ConCH4+ConCH3Cl+ConCH2Cl2+ConCHCl3+ConCCl4)+0.88*
10^-2*PPPP)/100/CCv/p*(T(i,j)/293); %коэффициент температуропроводности

TprPr(i,j)=T(i,j)+Dx(i,j)*(POTX2-POTX1)/4/dx^2*dt+Dx(i,j)*(POTY2*(i+1)-
POTY1*(i-1))/4/dy^2*dt;

if (RashGaz==1)
aaa=bbb/T(i,j); %расчет отношения сред.объемной темпер-ры к темп-ре в
точке
else
aaa=1;
end

if (IIIII0(i)>0)
WF=2*e1*CLOR(i,j)*aaa*I0*IIIII0(i)*exp(-e1*CLOR(i,j)*aaa*dx*j)*exp(-
10.59*dx*j);
else
WF=0;
end
WT=2*kt*M*aaa*CLOR(i,j)*aaa*exp(-Et/R/TprPr(i,j));
WW=WF+WT;

if (CLOR(i,j)>=0)
A=WW*CLOR(i,j)*aaa;

if (CH4(i,j)>=0)
A1=k11*k14/k12*CH4(i,j)*aaa*exp(-(EE11-EE12)/R/TprPr(i,j));
else
A1=0;
end

if (CH3Cl(i,j)>=0)
A2=k21*k24/k22*CH3Cl(i,j)*aaa*exp(-(EE21-EE22)/R/TprPr(i,j));
else
A2=0;
end

if (CH2Cl2(i,j)>=0)
A3=k31*k34/k32*CH2Cl2(i,j)*aaa*exp(-(EE31-EE32)/R/TprPr(i,j));
else
A3=0;
end

```

```

end
if (CHCl3(i,j)>=0)
A4=k41*k44/k42*CHCl3(i,j)*aaa*exp(-(EE41-EE42)/R/TprPr(i,j));
else
A4=0;
end

A5=k5*M*aaa;
Cl(i,j)=(A/(A1+A2+A3+A4+A5))^0.5;
else
    Cl(i,j)=0;
end

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% 1-я стадия %%%%%%%%%%%%%%%
    if (CH4(i,j)>=0)
WW1(i,j)=k11*CH4(i,j)*aaa*Cl(i,j)*exp(-EE11/R/TprPr(i,j))*dt;
%%образование хлорметана
if((CH4(i,j)-WW1(i,j))>=0)
CH4(i,j)=CH4(i,j)-WW1(i,j); %концентрация метана на следующий шаг
CH3Cl(i,j)=CH3Cl(i,j)+WW1(i,j); %концентрация хлорметана
else
CH4(i,j)=CH4(i,j)-CH4(i,j); %концентрация метана на следующий шаг
CH3Cl(i,j)=CH3Cl(i,j)+CH4(i,j); %концентрация хлорметана
WW1(i,j)=CH4(i,j);
end

        else
            CH3Cl(i,j)=0;
            WW1(i,j)=0;
        end

    end

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% 2-я стадия %%%%%%%%%%%%%%%
    if (CH3Cl(i,j)>=0)
WW22(i,j)=CH3Cl(i,j)-WW1(i,j);
WW2(i,j)=k21*WW22(i,j)*aaa*Cl(i,j)*exp(-EE21/R/TprPr(i,j))*dt;
%%образование дихлорметана
if((CH3Cl(i,j)-WW2(i,j))>=0)
CH3Cl(i,j)=CH3Cl(i,j)-WW2(i,j); %концентрация хлорметана на следующий шаг
CH2Cl2(i,j)=CH2Cl2(i,j)+WW2(i,j); %концентрация дихлорметана
else
CH3Cl(i,j)=CH3Cl(i,j)-WW22(i,j); %концентрация хлорметана на следующий шаг
CH2Cl2(i,j)=CH2Cl2(i,j)+WW22(i,j); %концентрация дихлорметана
WW2(i,j)=WW22(i,j);
end

        else
            CH3Cl(i,j)=0;
            WW2(i,j)=0;
        end

    end

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% 3-я стадия %%%%%%%%%%%%%%%
    if (CH2Cl2(i,j)>=0)
WW33(i,j)=CH2Cl2(i,j)-WW2(i,j);
WW3(i,j)=k31*WW33(i,j)*aaa*Cl(i,j)*exp(-EE31/R/TprPr(i,j))*dt;
%%образование трихлорметана
if((CH2Cl2(i,j)-WW3(i,j))>=0)
CH2Cl2(i,j)=CH2Cl2(i,j)-WW3(i,j); %концентрация дихлорметана на следующий шаг

```

```

CHC13(i,j)=CHC13(i,j)+WW3(i,j); %концентрация трихлорметана
else
CH2C12(i,j)=CH2C12(i,j)-WW33(i,j); %концентрация дихлорметана на следующий
шаг
CHC13(i,j)=CHC13(i,j)+WW33(i,j); %концентрация трихлорметана
WW3(i,j)=WW33(i,j);
end

        else
            CH2C12(i,j)=0;
            WW3(i,j)=0;
        end

        %%%%%%%%%% 4-я стадия %%%%%%%%%%
            if (CHC13(i,j)>=0)
WW44(i,j)=CHC13(i,j)-WW3(i,j);
WW4(i,j)=k41*WW44(i,j)*aaa*C1(i,j)*exp(-EE41/R/TrPr(i,j))*dt;
%%образование тетрахлорметана
if((CHC13(i,j)-WW4(i,j))>=0)
CHC13(i,j)=CHC13(i,j)-WW4(i,j); %концентрация трихлорметана на следующий
шаг
CC14(i,j)=CC14(i,j)+WW4(i,j); %концентрация тетрахлорметана
else
CHC13(i,j)=CHC13(i,j)-WW44(i,j); %концентрация трихлорметана на следующий
шаг
CC14(i,j)=CC14(i,j)+WW44(i,j); %концентрация тетрахлорметана
WW4(i,j)=WW44(i,j);
end

            else
                CHC13(i,j)=0;
                WW4(i,j)=0;
            end

CLOR(i,j)=CLOR(i,j)-WW1(i,j)-WW2(i,j)-WW3(i,j)-WW4(i,j); %% концентрация
хлора

            if(CLOR(i,j)>0)
QQQQQ=(WW1(i,j)*Q1+WW2(i,j)*Q2+WW3(i,j)*Q3+WW4(i,j)*Q4);
QQQQQ=QQQQQ/(Cv1(i,j)+Cv2(i,j)+Cv3(i,j)+Cv4(i,j)+Cv5(i,j))/p; %%сколько
тепла (Кельвин) прибавилось
            else

CLOR(i,j)=0;
QQQQQ=0;

            end
            nn(i,j)=1.90*10^-14*(T(i,j))^4;
            TrPr(i,j)= TrPrPr(i,j) + (1-nn(i,j))*QQQQQ;

end
        %%% Y
end
    %%% X
T=TrPr;
TTT(it)=sum(sum(T))/npx/npy;
CLORR(it)=sum(sum(CLOR))/npx/npy;

            if (nnout==0)

surf(X,Y,T)

```

```

        %colormap autumn                % от красного к желтому (для
вероятности уровни)
colormap jet                            % от синего до красного (для
вероятности) (для давления)
xlabel('x,m')
ylabel('y,m')
zlabel('T,K')
%axis([x1 x2 y1 x2 0 50])
axis([x1 x2 y1 y2 0 2000])
%'pause Step'
pause (0.01)

                                end

    end                                %%%% for it=1:nstep

save W1.mat WWW1 -ascii
save W2.mat WWW2 -ascii
save W3.mat WWW3 -ascii
save W4.mat WWW4 -ascii
save W5.mat WWW5 -ascii
save TT.mat TTpoint2 -ascii
save t1.mat ttt -ascii
set(handles.pushbutton3, 'Enable', 'on') %делает кнопку доступной График1
set(handles.pushbutton4, 'Enable', 'on') %делает кнопку доступной График2

function edit6_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit6 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit6 as text
%         str2double(get(hObject,'String')) returns contents of edit6 as a
double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function edit6_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit6 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%         See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function edit7_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit7 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit7 as text
%         str2double(get(hObject,'String')) returns contents of edit7 as a
double

```

```

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function edit7_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit7 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%         See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function edit8_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit8 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit8 as text
%         str2double(get(hObject,'String')) returns contents of edit8 as a
double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function edit8_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit8 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%         See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function edit9_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit9 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit9 as text
%         str2double(get(hObject,'String')) returns contents of edit9 as a
double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function edit9_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit9 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%         See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

```

```

end

function edit1_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to edit1 (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles      structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit1 as text
%          str2double(get(hObject,'String')) returns contents of edit1 as a
double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function edit1_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to edit1 (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles      empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%          See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function edit2_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to edit2 (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles      structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit2 as text
%          str2double(get(hObject,'String')) returns contents of edit2 as a
double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function edit2_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to edit2 (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles      empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%          See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function edit3_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to edit3 (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles      structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit3 as text
%          str2double(get(hObject,'String')) returns contents of edit3 as a
double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function edit3_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

```

```

% hObject    handle to edit3 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%         See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function edit4_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit4 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit4 as text
%         str2double(get(hObject,'String')) returns contents of edit4 as a
double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function edit4_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit4 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%         See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function edit5_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit5 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit5 as text
%         str2double(get(hObject,'String')) returns contents of edit5 as a
double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function edit5_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit5 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%         See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

```

```

function edit10_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to edit10 (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles      structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit10 as text
%          str2double(get(hObject,'String')) returns contents of edit10 as a
double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function edit10_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to edit10 (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles      empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%          See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

% --- Executes on button press in pushbutton3.
function pushbutton3_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to pushbutton3 (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles      structure with handles and user data (see GUIDATA)
load W1.mat -ascii
load W2.mat -ascii
load W3.mat -ascii
load W4.mat -ascii
load W5.mat -ascii
load t1.mat -ascii
s1='g'; %зеленая
s2='r'; %красная
s3='m'; %фиолетовая
s4='b'; %синий
s5='--'; %пунктирная
figure
ylabel('C, моль/м3')
xlabel('t, с')
hold on
plot(t1,W1,s1)      %%метан %%зеленая
hold on
plot(t1,W2,s2)      %%хлорметан %%красная
hold on
plot(t1,W3,s3)      %% дихлорметан %%фиолетовая
hold on
plot(t1,W4,s4)      %% трихлорметан %%синия
hold on
plot(t1,W5,s5)
hold on%%тетрахлорметан %%пунктирная
legend('метан', 'хлорметан', 'дихлорметан', 'трихлорметан',
'тетрахлорметан')
hold on

```

```
% --- Executes on button press in pushbutton4.
function pushbutton4_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to pushbutton4 (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles      structure with handles and user data (see GUIDATA)
load TT.mat -ascii
load t1.mat -ascii
s2='r'; %красная
figure
ylabel('T,K')
xlabel('t,c')
hold on
plot(t1,TT,s2)
hold on
```

Приложение В
(обязательное)

**СВИДЕТЕЛЬСТВА
О РЕГИСТРАЦИИ ПРОГРАММЫ ДЛЯ ЭВМ**

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2016662831

«Математическая модель фототеплового воспламенения»

Правообладатели: *Грохотов Михаил Андреевич (RU), Бегишев Ильдар Рафатович (RU), Беликов Анатолий Константинович (RU), Комаров Александр Андреевич (RU)*

Авторы: *Грохотов Михаил Андреевич (RU), Беликов Анатолий Константинович (RU), Комаров Александр Андреевич (RU), Бегишев Ильдар Рафатович (RU)*



Заявка № 2016660589

Дата поступления 03 октября 2016 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 23 ноября 2016 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев Г.П. Ивлиев

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2017662988

**«Расчётный метод определения показателей
пожаровзрывоопасности газовых смесей»**

Правообладатели: *Грохотов Михаил Андреевич (RU), Бегишев Ильдар Рафатович (RU), Беликов Анатолий Константинович (RU), Комаров Александр Андреевич (RU)*

Авторы: *Грохотов Михаил Андреевич (RU), Беликов Анатолий Константинович (RU), Комаров Александр Андреевич (RU), Бегишев Ильдар Рафатович (RU)*

Заявка № 2017660146

Дата поступления 04 октября 2017 г.

Дата государственной регистрации
в Реестре программ для ЭВМ 22 ноября 2017 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев Г.П. Ивлиев