

ОТЗЫВ

официального оппонента,

доктора технических наук Шебеко Юрия Николаевича
на диссертационную работу Грохотова Михаила Андреевича «Методика прогнозирования скорости распространения фронта пламени при сгорании газоздушного облака в открытом пространстве», представленную на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.26.03 «Пожарная и промышленная безопасность» (нефтегазовая отрасль, технические науки)

Представленная на отзыв диссертационная работа Грохотова Михаила Андреевича «Методика прогнозирования скорости распространения фронта пламени при сгорании газоздушного облака в открытом пространстве» состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка литературы и трёх приложений. Содержание работы изложено на 140 страницах текста, включает в себя 21 таблицу и 47 рисунков. Содержание работы изложено правильным научным языком и достаточно полно и понятно передаёт суть и содержание проведённого исследования.

На территории объектов нефтегазовой отрасли в результате разрушения (разгерметизация) технологического оборудования или трубопровода возможно образование пожаровзрывоопасных газоздушных облаков. Воспламенение таких облаков приводит к пожарам, взрывам, разрушениям зданий (сооружений) и гибели людей. В связи с этим для выбора мероприятий по пожаровзрывозащите объекта проводится анализ опасности и определение параметров аварийных взрывов. Основное влияние на значение параметров дефлаграционного взрыва оказывает скорость распространения фронта пламени (СРФП). Проведя своей работе анализ методик прогнозирования СРФП Грохотов М.А. выявил, что для одного и того же сценария аварии получаются существенно разные значения СРФП. Это сильно влияет на параметры взрыва. Поэтому встаёт во-

вх. л. 6 / 206 ст 29.10.2018

прос о развитии методик прогнозирования СРФП при сгорании газозвудушных смесей (ГВС).

Исходя из вышесказанного, выбранная соискателем тема исследования является актуальной, так как в настоящее время имеющиеся методики для определения СРФП при сгорании ГВС не обладают достаточно высокой точностью.

Целью своей диссертации Грохотов М.А. ставит совершенствование методики прогнозирования СРФП при сгорании газозвудушного облака в открытом пространстве.

Для достижения поставленной цели Грохотовым М.А. обосновано сформулированы следующие задачи:

1. Выполнить анализ существующих методик определения параметров взрыва ГВС в открытом пространстве и выявить их недостатки.

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 по формуле, учитывающей физико-химические и газодинамические свойства горючей среды.

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

Научная новизна работы заключается в полученных следующих новых научных результатов:

1. Разработана математическая модель фототеплового воспламенения, которая учитывает химическую кинетику и термодинамику процесса и позволяет рассчитывать показатели пожаровзрывоопасности горючих газовых смесей.

2. Получена теоретически обоснованная формула для расчёта СРФП при сгорании ГВС.

3. 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 Грохотова М.А. определяется следующими результатами:

1. Разработана математическая модель фототеплового воспламенения, базирующаяся на кинетике химического взаимодействия и тепловой теории распространения пламени. Указанная модель является универсальной и может быть использована для определения показателей пожаровзрывоопасности широкого класса газовых смесей с известными кинетическими параметрами и теплофизическими свойствами.

2. Основываясь на теории гидродинамики и теории распространения пламени, получена формула для расчёта СРФП, учитывающая физико-химические и газодинамические свойства газовой среды, которая может применяться для прогнозирования последствий аварийных взрывов.

Обоснованность и достоверность основных результатов, представленных в работе Грохотова М.А., подтверждается:

1. Обоснованностью выбора параметров и критериев, позволяющих сравнивать теоретические и экспериментальные данные.

2. Экспериментальные исследования выполнялись с применением измерительного оборудования, прошедшего поверку и откалиброванного для соответствующих условий.

3. Внутренней непротиворечивостью результатов и их согласованностью с результатами экспериментов и данными других авторов.

Основные выводы диссертационной работы Грохотова М.А. вытекают из экспериментального и теоретического материала и не вызывают сомнений.

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, определены цель, задачи, объект и предмет исследования. Показана научная новизна работы, её теоретическая и практическая значимость. Представлены положения,

выносимые на защиту, и сведения о внедрении и апробации результатов работы.

В первой главе выполнен анализ методик прогнозирования зон воздействия поражающих факторов при внешних взрывах ГВС на пожаровзрывоопасных объектах. Установлено, что существует две группы методик. Первая группа методик базируется на моделировании ударных волн (скорость распространения пламени превышает скорость звука в газе), образующихся при взрыве конденсированных взрывчатых веществ (ВВ). Данный принцип теоретически обоснован и экспериментально подтверждён для воздушных ударных волн, возникающих при взрывах ВВ и детонационных взрывах ГВС. Основным показателем, характеризующим параметры ударной волны, определяется через энергopotенциал смеси. Вторая группа методик моделирует дефлаграционный взрыв, в котором скорость распространения пламени не превышает скорости звука, в силу чего основное воздействие создаёт волна сжатия. В данных методиках основным фактором, влияющим на численные значения параметров волны сжатия, является СРФП. Анализ взрывов ГВС, произошедших на объектах нефтегазовой отрасли, показал, что, как правило, реализуется дефлаграционный взрыв. Поэтому особое внимание было уделено методикам, описывающим именно дефлаграционный взрыв.

В результате анализа значений основных параметров взрыва (избыточное давление и импульс фазы сжатия), полученных по рассматриваемым методикам, установлено, что они дают схожие результаты при одинаковой СРФП. Основное различие заключается в методе определения СРФП, которые для одного и того же сценария аварийного взрыва дают существенно разные значения СРФП.

Исходя из выполненных анализов в первой главе, Грохотовым М.А. сформулирована проблема, поставлена цель и задачи диссертационной работы.

Во второй главе кратко анализируются существующие методы определения показателей пожаровзрывоопасности газовых смесей и выявляются их недостатки. Продемонстрирована связь показателей пожаровзрывоопасности

газовых смесей с химической кинетикой процесса. Для этого была разработана математическая модель фототеплового воспламенения.

Математическая модель фототеплового воспламенения учитывает кинетику химической реакции и теплофизические параметры газовой смеси. В качестве источника инициирования химической реакции в модели может выступать тепло и/или ультрафиолетовое излучение (УФ-излучение). Для описания изменения температуры в смеси применяется уравнение теплопроводности. При решении уравнения теплопроводности значения коэффициентов теплопроводности и теплоёмкости рассчитывали для исходного состава смеси, а в ходе химического превращения учитывали их изменение только от температуры.

Верификация математической модели фототеплового воспламенения выполнена на примере горения смесей хлора с метаном, хлорметаном и дихлорметаном. Рассмотрена кинетика химических реакций данных смесей и приведены теплофизические параметры.

Изменяя исходные условия (начальную температуру, интенсивность излучения, концентрации компонентов исходной горючей смеси), определяли показатели пожаровзрывоопасности (концентрационные пределы распространения пламени, критическую интенсивность УФ-излучения, минимальную флегматизирующую концентрацию, температуру самовоспламенения) исследуемых горючих смесей.

Удовлетворительная сходимость результатов расчётов с экспериментальными данными и данными, приведёнными в справочной литературе, подтверждает возможность использования модели фототеплового воспламенения для определения показателей пожаровзрывоопасности газовых смесей.

В третьей главе описаны исследования по определению параметров распространения пламени. Серия экспериментов направлена на исследование изменения СРФП при сгорании пропановоздушной смеси стехиометрического состава в зависимости от расположения источника зажигания и условий расширения сгорающей смеси. Установлено, что при зажигании в центре газового облака скорость распространения пламени в 2 раза больше, чем при его зажигании

на границе. Фронт пламени ускоряется, движется постоянно и замедляется на расстоянии 30 %, 55 % и 15 % от расстояния, пройденного пламенем, соответственно. Максимальное расстояние, пройденное пламенем, составляет не более $R_{\text{ПЛ}} = 0,75R_{\text{об}}\varepsilon$ (здесь $R_{\text{об}}$ – радиус газового облака; ε – коэффициент расширения продуктов сгорания).

На основе теории гидродинамики и распространения пламени получена формула для определения СРФП. Было принято допущение, что распространение пламени подобно течению жидкости в гладких трубах, а также, что коэффициент температуропроводности в газовой смеси пропорционален коэффициенту гидравлического трения.

Сравнение результатов расчётов СРФП для различных газоздушных смесей по полученной формуле с результатами по существующим методикам показало удовлетворительную сходимость значений СРФП. Тем самым была подтверждена возможность применения полученной формулы для прогнозирования СРФП при сгорании ГВС.

В четвёртой главе рассмотрены аварийные взрывы, произошедшие в 1974 году в Англии на заводе «Нипро Кемикл Планта» и в 2010 году в России на 2169 км участка газопровода «Нижневартовск–Курган–Куйбышев». По данным, полученным экспертами в ходе расследования этих аварий, с применением существующих методик и предложенной методики определена возможная СРФП. Сопоставление полученных значений избыточного давления с классификацией степени повреждений зданий, предложенной АО «ЦНИИПромзданий» для последствий взрыва, позволило установить, что значения СРФП, полученные по предложенной методике, достоверно отражают картину последствий взрыва. Поэтому методику можно применять для определения СРФП при дефлаграционном взрыве ГВС.

В заключении сформулированы основные выводы и рекомендации, полученные в ходе выполнения диссертации.

В приложениях представлены: акты внедрения полученных результатов, код программы на языке *MATLAB*, свидетельства с регистрации программы для ЭВМ.

По диссертационной работе имеются следующие **замечания**:

1. На с.40 (формула (2.30)) ошибочно написано, что коэффициент теплопроводности газовой смеси линейно растёт с температурой. Однако в соответствии с имеющимися в литературе данными данный коэффициент пропорционален корню квадратному из температуры (см., например, Р.Рид, Дж.Праусниц, Т.Шервуд. Свойства газов и жидкостей. Л., Химия, 1982).

2. На с.59 отмечено, что в каких-то случаях более низкую минимальную флегматизирующую концентрацию имеет трифторметан, а в каких-то случаях тетрафторметан. Объяснения этого различия в диссертации не приведено.

3. В главе 3 исследуется изменение СРФП пропановоздушной смеси в протяжённой камере, тогда как в диссертационном исследовании стояла задача определения СРФП на открытой местности.

4. При определении расстояния перехода горения в турбулентный режим не разъяснено, на каком основании приравниваются числа Рейнольдса в ламинарном и детонационном режимах горения газовой смеси.

Отмеченные недостатки не снижают безусловной научной и практической ценности диссертации и не влияют на общую оценку работы. Данные замечания носят рекомендательный характер и определяют дальнейшую работу соискателя в этой области исследования.

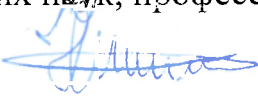
Содержание автореферата достоверно и достаточно полно отражает содержание диссертации.

Работы, опубликованные Грохотовым М.А. (13 научных публикаций), в полной мере отражают основное содержание и сущность проведенного исследования.

На основании рассмотрения материалов, представленных на отзыв, могу заключить, что в соответствии с п. 9 постановления Правительства Российской Федерации № 842 от 24.09.2013 г. «О порядке присуждения учёных степеней»

диссертация Грохотова М.А. является законченной научно-квалификационной работой. В ней содержится решение научной задачи, имеющее существенное значение для обеспечения безопасности и развития нефтегазовой отрасли, а ее автор достоин присуждения учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.26.03 «Пожарная и промышленная безопасность» (нефтегазовая отрасль, технические науки).

Главный научный сотрудник
научно-исследовательского центра
нормативно-технических
проблем пожарной безопасности
ФГБУ ВНИИПО МЧС России,
доктор технических наук, профессор

 Шебеко Юрий Николаевич

« 24 » 10 2018 г.

Подпись Шебеко Юрия Николаевича заверяю
Ученый секретарь ФГБУ ВНИИПО МЧС России
кандидат технических наук,
старший научный сотрудник



Е.Ю. Сушкина

143903, Московская область, г. Балашиха,
мкр. ВНИИПО, д. 12. Тел.: +7 (495) 529-84-66,
e-mail: yn_shebeko@mail.ru