

ОТЗЫВ

официального оппонента, профессора кафедры промышленной безопасности и охраны окружающей среды федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина», доктора технических наук, доцента,

Фоминой Екатерины Евгеньевны

на диссертацию Тетерина Ивана Александровича на тему «Методика определения давления взрыва газоздушного облака при аварийных выбросах сжиженного природного газа с учетом его состава», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.10.1. – Пожарная безопасность (технические науки)

Актуальность темы исследования

Актуальность исследования обусловлена ростом объемов производства, транспортирования и хранения сжиженного природного газа (СПГ) в рамках реализации долгосрочной программы развития отрасли в Российской Федерации. Внедрение масштабных проектов по производству СПГ, таких как «Арктик СПГ-2» и других, связано с увеличением количества потенциально опасных объектов, на которых возможно возникновение аварийных ситуаций, включая выбросы горючих веществ в атмосферу. Особую опасность представляют аварийные выбросы СПГ, которые могут привести к образованию газоздушного облака и последующему его взрыву (дефлаграционному или детонационному). При этом точное прогнозирование давления взрыва и зоны его воздействия является критически важным для обеспечения промышленной и пожарной безопасности, проектирования защитных мероприятий и оценки пожарного риска.

С января 2025 года вступил в силу новый Приказ МЧС России от 26.06.2024 № 533 «Об утверждении методики определения расчетных величин пожарного риска на производственных объектах», который установил новые требования к оценке пожарного риска, в том числе с учетом сценариев крупных аварий с выбросом горючих газов. В отличие от предыдущей версии методики, данный документ требует более детального подхода к моделированию процессов распространения газового облака и оценке параметров его взрыва, что подчеркивает необходимость разработки и внедрения уточненных методик расчета. Вместе с тем современные инженерные практики и действующие нормативные документы зачастую не учитывают полный спектр влияния состава СПГ (включающего метан, этан, пропан и другие углеводороды) на параметры формирования и взрыва газоздушного облака. Это снижает достоверность оценок пожарного риска, особенно для сложных сценариев аварий на объектах СПГ.

Таким образом, разработка научно обоснованной методики определения давления взрыва газоздушного облака при аварийных выбросах СПГ с учетом его состава становится особенно актуальной задачей. Она позволит повысить точность расчетов пожарного риска в соответствии с новыми требованиями Приказа МЧС № 533, обеспечить соответствие международным стандартам анализа опасностей и способствовать безопасному развитию применения СПГ в России.

Вх № 6/71 от 18.07.2025

Общая характеристика работы

Автором диссертационной работы проведен обширный литературный анализ в области теории горения и взрыва, рассмотрены работы, которые легли в основу нормативной базы, а также альтернативные методики. По тексту диссертации видно, что соискатель тщательно изучил особенности СПГ, его термодинамические свойства, работы исследователей в области криогенной техники, нормативные документы, определяющие основные характеристики СПГ. Следует отметить публикационную активность соискателя (опубликовано 28 научных работ по теме диссертации), а также доклады не только на профильных конференциях по горению и взрыву, но и по проблемам СПГ, что позволило обсудить с экспертами отрасли результаты работы и получить профессиональную консультацию.

Особого внимания заслуживает подход, выработанный Тетериным И.А. при постановке задач для достижения поставленной цели. Экспериментальные исследования разделены на несколько этапов, которые отдельно акцентируют внимание на физико-химических и газодинамических особенностях взрывного горения различных смесевых композиций модельных составов СПГ. Причем для проведения экспериментальной части задействована лабораторная база двух организаций, что, несомненно, говорит об обсуждении результатов с различными научными коллективами. Экспериментальным исследованиям предшествует тщательный теоретический анализ как физико-химических, так и газодинамических особенностей горения газовоздушных смесей, что позволяет поставить на высоком уровне эксперимент и учесть при проведении технических экспериментов достижения современной фундаментальной науки.

Тетерин И.А. не только разработал методику, но и продемонстрировал дальнейшие направления для исследований, показал границы применения разработанной методики, необходимость исследования детонационного режима горения различных смесевых композиций основных горючих компонентов СПГ.

Всесторонность рассмотренного вопроса, большое количество проведенных экспериментальных исследований, обширный литературный анализ позволяют говорить о высоком уровне полученных результатов исследования. Работа является целостной и завершенной.

Содержание работы

Во введении обоснована актуальность темы исследования и степень ее разработанности, сформулированы цель, задачи, объект и предмет исследования, показана научная новизна работы, ее теоретическая и практическая значимость, представлены степень достоверности и апробация результатов.

В первой главе «Анализ существующих методик определения давления взрыва газовоздушных смесей» выполнен анализ пожаров и взрывов СУГ и СПГ. Продемонстрированы основные пожаровзрывоопасные отличия данных газов, которые связаны с их термодинамическими свойствами. Показано, что состав основных горючих компонент СПГ изменяется в зависимости от марки и представлен метаном, этаном, пропаном и бутаном. Проведен литературный обзор по оценке взрывоопасности СПГ. Выполнен расчет взрыва газовоздушного облака при аварии с СПГ (по метану) по различным методикам, выявлены основные их недостатки и предложена теоретическая зависимость по определению давления взрыва исходя из аддитивного вклада основных горючих компонент СПГ. Также в

первой главе предложено рассматривать концентрационные пределы распространения пламени по правилу Ле Шателье с целью учета влияния горючих компонентов. Однако показана необходимость детального физико-химического анализа теоретических предложений, так как существует возможность химического взаимодействия основных горючих компонентов СПГ. Для давления взрыва дополнительно необходимо исследовать изменение газодинамических свойств различных смесевых композиций основных горючих компонентов СПГ.

Тетерин И.А. отмечает работы других авторов по теоретическому обоснованию аддитивного влияния различных компонент взрывчатых веществ на давление взрыва, но обращает внимание, что аддитивность обосновывалась исходя из физической постановки задачи без учета химического взаимодействия компонентов взрывчатого вещества. Также соискателем рассмотрена работа коллектива авторов по определению давления взрыва для детонационного режима сгорания облака природного газа, где авторы рассматривают природный газ как смесь метана и его гомологов, однако данная работа является теоретической и не учитывает дефлаграционный режим сгорания газоздушного облака.

Во второй главе «Анализ физико-химических особенностей горения основных горючих компонентов сжиженного природного газа» изучены теплофизические и кинетические особенности горения легких алканов. Показаны различие теплофизических характеристик в гомологическом ряду алканов. Рассмотрены работы других авторов в данном направлении. На основании современной кинетической базы данных соискателем построены вероятностные схемы горения основных горючих компонентов СПГ. Продемонстрировано, что наличие примесей пропана в СПГ может ингибировать горение метана, что обосновало необходимость проведения детальных экспериментальных исследований.

В третьей главе «Экспериментальное исследование взрывоопасности паров сжиженного природного газа» на основании анализа литературных данных разработан модельный состав СПГ исходя из наиболее пожароопасного сценария для проведения экспериментальных исследований. Выполнены эксперименты по определению давления взрыва для различных смесевых композиций основных горючих компонентов СПГ, а также концентрационных пределов распространения пламени. Определено, что метан, этан, пропан и бутан вносят аддитивный вклад в давление взрыва. На основании аддитивного вклада основных горючих компонентов СПГ на давление взрыва разработана «Методика определения давления взрыва газоздушного облака при аварийных выбросах СПГ с учетом его состава». Расчет по разработанной методике позволил отнести наиболее пожаровзрывоопасный по составу СПГ к 3 классу по степени чувствительности к возбуждению взрывных процессов, а для марки А обосновать возможность проведения расчетов по метану. Также экспериментально подтверждена правомерность использования правила Ле Шателье для определения концентрационных пределов распространения пламени СПГ.

В четвертой главе «Влияние газодинамических особенностей распространения пламени на давление взрыва паров сжиженного природного газа» показано, что качественно влияние турбулизации на давление взрыва различных смесевых композиций основных горючих компонентов СПГ можно изучать в

закрытых сосудах. Анализ литературных данных позволил установить, что для оценки степени интенсификации горения за счет газодинамических возмущений наиболее широко используется критерий Рейнольдса. Расчет числа Рейнольдса различных смесевых композиций метан/пропан/воздух, продемонстрировал линейную зависимость, что теоретически определило линейную зависимость изменения давления взрыва для различных смесевых композиций метан/пропан/воздух. Полученная зависимость была подтверждена экспериментально. Таким образом, разработанная методика в третьей главе диссертации может использоваться с учетом турбулизации пламени. Соискатель установил границы применения методики и продемонстрировал дальнейшие направления исследования взрывоопасности паров СПГ.

В **заключении** сформулированы основные выводы и рекомендации, полученные в ходе выполнения работы. В **приложении** представлены акты внедрения, а также предэкспоненциальные множители, которые необходимы были для кинетического анализа горения основных горючих компонентов СПГ.

Научная новизна работы:

– экспериментально установлена линейная зависимость изменения концентрационных пределов распространения пламени в смеси основных горючих компонентов СПГ;

– экспериментально установлен аддитивный вклад основных горючих компонентов СПГ на давление взрыва в близкой к стехиометрической смеси с воздухом.

Теоретическая и практическая значимость работы заключается в:

– получении зависимости изменения концентрационных пределов распространения пламени паров СПГ при различных соотношениях метан/этан/пропан/бутан/воздух;

– получении зависимостей изменения давления взрыва модельного состава паров СПГ при различных соотношениях метан/этан/пропан/бутан/воздух;

– экспериментальном подтверждении возможности применения правила Ле Шателье для определения концентрационных пределов распространения пламени паров СПГ с учетом его состава;

– разработке методики определения давления взрыва газовойоздушного облака при аварийных выбросах СПГ с учетом его состава.

Замечания:

1. На рис. 1.11 приведена зависимость давления взрыва от расстояния при одинаковой видимой скорости распространения пламени (70 м/с), полученная по методикам приказа МЧС России № 404 от 10.07.2009 и МГСУ. На мой взгляд, не хватает информации по действующей методике МЧС № 533 от 26.06.2024 г.

2. В состав СПГ помимо рассматриваемых в работе метана, этана, пропана и бутана могут входить и другие примеси, например, азотных и комплексных соединений серы, воды, углекислого газа и сероводорода. Как эти примеси повлияют на расчет давления взрыва газовойоздушного облака при аварийном выбросе СПГ по предложенной автором методике?

3. На мой взгляд, сформулированная автором методика тремя формулами в разделе 3.5 была бы более интересна с точки зрения практического применения если бы содержала модели аварийного пролива СПГ с учетом его состава и

распространения паров СПГ с формированием смесей с воздухом.

4. По тексту диссертации встречаются опечатки: рис. 3.4 «C₃H₈» отмечено как «CH₃»; в научной новизне фразу «установлена линейна зависимость» следует написать «линейная»; множественное число «компонентов СПГ» в работе представлено как «компонент СПГ» и др.

Заключение

Указанные замечания не снижают общего положительного впечатления от диссертации.

Диссертация Тетерина Ивана Александровича «Методика определения давления взрыва газоздушного облака при аварийных выбросах сжиженного природного газа с учетом его состава» является актуальной, завершённой, самостоятельной научно-квалификационной работой, имеющей научную новизну и практическую значимость. Содержание диссертации соответствует паспорту специальности 2.10.1. Пожарная безопасность (технические науки): пункту 3: «Разработка научных основ, моделей и методов исследования процессов горения, пожаро- и взрывоопасных свойств веществ, материалов, производственного оборудования и конструкций», пункту 4: «Исследование процессов протекания аварий, пожаров и взрывов, условий их каскадного и катастрофического развития, разработка методов оценки различных опасных воздействий на людей, объекты защиты и прилегающие территории, а также способов их снижения».

По содержанию, научной и практической значимости представленная диссертация отвечает критериям, предъявляемым к кандидатским диссертациям (пп. 9-11, 13, 14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24.09.2013 г. (ред. от 16.10.2024)), а ее автор, Тетерин Иван Александрович, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.10.1. Пожарная безопасность (технические науки).

Профессор кафедры промышленной безопасности
и охраны окружающей среды
РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина
доктор технических наук, доцент


Е.Е. Фомина

«17» июля 2025 г.

Подпись Фоминой Екатерины Евгеньевны заверяю

Начальник отдела кадров
РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина


Ю.Е. Ширяев

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина»; адрес: Ленинский проспект, 65, корп. 1, г. Москва, РФ, 119991. Телефон: +7(499) 507-88-88. Официальный сайт: <https://www.gubkin.ru>. Электронная почта: com.@gubkin.ru.

Телефон Фоминой Е.Е.: +7(916)618-33-68, E-mail: fomina.e@gubkin.ru