

### Отзыв

официального оппонента доктора технических наук, профессора Комарова Александра Андреевича на диссертацию Шебеко Алексея Юрьевича «Пожарная безопасность газовых технологических сред производственных процессов нефтегазовой отрасли», представленную на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.26.03 «Пожарная и промышленная безопасность» (технические науки, нефтегазовая отрасль)

В последние годы происходит быстрое развитие и внедрение новых эффективных производственных процессов на объектах нефтегазовой отрасли, связанных с обращением в технологических аппаратах больших количеств горючих газов, легковоспламеняющихся и горючих жидкостей. При этом в технологических средах может присутствовать кислород в концентрациях, отличных от воздуха. Специфика технологических процессов предприятий отрасли требует применения искробезопасных конструкционных материалов. Зачастую остро стоит вопрос о применении такого способа ограничения распространения аварийных газовых облаков, как водяные и газовые завесы. В качестве сред для пожаротушения и взрывопреждения активно используются фторированные углеводороды. В то же время их эффективность для технологических сред с концентрациями кислорода, отличными от воздуха, остается малоизученной. Совокупность изложенных выше положений свидетельствует о том, что тема рассматриваемой диссертационной работы, посвященной обеспечению пожарной безопасности технологических сред производственных процессов предприятий нефтегазовой отрасли, представляется актуальной.

Работа состоит из введения, девяти глав, заключения, списка литературы и приложения. Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи исследования, определены положения, характеризующие научную новизну работы и ее практическую значимость, обоснована достоверность полученных результатов, представлены сведения об апробации работы и публикации по ее теме.

Первая глава посвящена анализу публикаций в области исследования характеристик горения газовых смесей сложного состава в различных окислительных средах, в том числе содержащих кислород с концентрацией, отличающейся от соответствующей величины в воздухе, а также характеристики горения газовых смесей, содержащих флегматизирующие добавки различной химической природы. На основе проведенного анализа проведен выбор направлений исследований, направленных на обеспечение пожарной безопасности газовых технологических сред.

Во второй главе представлено описание экспериментальных установок и методик проведения экспериментов. Для изучения горения предварительно перемешанных газовых смесей использован экспериментальный стенд, представляющий собой сферическую реакционную камеру объемом 4,2 л (внутренний диаметр 20 см). Стенд предназначен для определения

Вх.л. 6/76 от 23.09.2019

концентрационных пределов распространения пламени, максимального давления взрыва, максимальной скорости нарастания давления взрыва и нормальной скорости горения. Эксперименты по определению характеристик диффузионного горения выполнялись на установке «Диффузия», характерной особенностью которой является возможность подачи огнетушащего газа как в поток горючего газа, так и в поток окислителя (воздуха).

В третьей главе изложены результаты экспериментального определения параметров горения околопредельных предварительно перемешанных смесей вида горючий газ (водород, метан) – окислительная среда (смесь азота и кислорода с содержанием  $O_2$  15, 20,6 и 25% (об.)) – фторированный флегматизатор (трифторметан, пентафторэтан, перфторбутан) в замкнутом сферическом сосуде. С увеличением содержания кислорода в окислителе концентрационная область распространения пламени существенно расширяется в основном за счет верхнего предела. При этом в ряде случаев нижний предел уменьшается с увеличением добавки фторированного углеводорода, т. е. налицо эффект промотирования горения. Такие параметры, как максимальное давление взрыва, максимальная скорость нарастания давления взрыва и нормальная скорость горения имеют максимумы как функции концентрации фторированного флегматизатора. Указанные результаты могут быть объяснены активным участием фторированных углеводородов в процессе горения, которое может проявляться как в виде ингибирующего, так и промотирующего действия.

В четвертой главе изложены результаты экспериментальных и теоретических исследований характеристик горения газов в окислительных средах на основе закиси азота. Для околопредельных смесей вида горючий газ (водород, метан) – закись азота – фторированный углеводород определены концентрационные пределы распространения пламени, максимальное давление взрыва, максимальная скорость нарастания давления взрыва, нормальная скорость горения. Введение в смеси, содержащих горючий газ и закись азота, фторированных флегматизаторов приводит к существенному уменьшению нижнего концентрационного предела распространения пламени (вплоть до 1% об.). Это говорит о возможности распространения пламени в смесях фторированного углеводорода и закиси азота при введении в них небольших (около 1% об.) водородсодержащих добавок (в данном случае автором использовался водород и метан). Как и в случае околопредельных смесей горючий газ – окислительная среда – фторированный флегматизатор наблюдаются максимумы в зависимостях максимального давления взрыва, максимальной скорости нарастания давления взрыва, нормальной скорости горения в зависимости от содержания фторированных углеводородов.

В пятой главе представлены результаты экспериментальных исследований влияния фторированных углеводородов на максимальное давление взрыва, нормальную скорость горения оклостехиометрических

смесей горючий газ (водород, метан) – окислительная среда (смесь азота и кислорода с содержанием  $O_2$  15, 20,6 и 25% об.). В зависимостях максимального давления взрыва от концентрации фторированных углеводородов при их содержании меньшем, чем 5%, об., наблюдаются небольшие максимумы, что говорит о дополнительном тепловыделении за счет химических превращений фторированных флегматизаторов. В то же время происходит достаточно резкое падение максимальной скорости нарастания взрыва и нормальной скорости горения. Это говорит о том, что судить об ингибировании или промотировании в данном случае можно только для конкретного параметра на основании его изменения в ходе экспериментов.

В шестой главе изложены результаты экспериментального определения огнетушащих концентраций газовых средств тушения (трифторметан, пентафторэтан, перфторбутан) по отношению к факелам водорода и метана в воздухе при их одновременной подаче в горючее и окислитель. Отмечены существенные отклонения экспериментальных данных от результатов расчета по обобщенному правилу Ле-Шателье.

Седьмая глава посвящена разработке и апробации методики оценки искробезопасности конструкционных материалов. Проведена апробация предложенной методики, что позволило создать ГОСТ Р 58068-2018 «Конструкционные материалы. Метод испытаний на искробезопасность».

В восьмой главе изложены результаты теоретических исследований особенностей процессов воспламенения и горения газовых сред сложного состава, в том числе процесса самоингибирования, условия применения правила Ле-Шателье для нижних концентрационных пределов распространения пламени смесей горючих газов и паров, минимальных флегматизирующих и огнетушащих концентраций для смесей огнетушащих газов, влияние добавок различной химической природы на нормальную скорость горения водорода в воздухе, влияние флегматизаторов различной химической природы на процесс самовоспламенения водородовоздушных смесей, влияние бромистого водорода на нормальную скорость горения смесей водорода и метана с воздухом и закисью азота, анализ различных представлений о природе концентрационных пределов распространения пламени в газовых смесях.

Девятая глава посвящена теоретической оценке параметров рассеяния сжиженного природного газа на твердую поверхность и исследованию влияния водяных и газовых завес на ограничение распространения облаков горючих газов и паров. При этом использован программный код FDS5. На основании проведенных исследований сделан вывод о том, что эффективность газовых и водяных завес определяется такими факторами, как расход газа и воды через форсунки, расстояние между завесой и защищаемым оборудованием, видом проектной аварии, для ограничения которой используется завеса. Отмечена более высокая эффективность водяных завес по сравнению с газовыми.

Основные результаты диссертации **достоверны и научно обоснованы**, что подтверждается их внутренней непротиворечивостью, согласованностью с законами физики и химии и данными других авторов, положительными результатами внедрения.

Диссертация обладает несомненной **научной новизной**, основные положения которой заключаются в следующем:

- получены новые экспериментальные данные по концентрационным пределам распространения пламени в смесях вида горючий газ (водород, метан) – флегматизатор – окислитель (смесь азота и кислорода с различным содержанием  $O_2$ ) – флегматизатор, а также параметрам взрыва (максимальное давление взрыва, максимальная скорость нарастания давления взрыва, нормальная скорость горения) для указанных смесей;

- получены новые экспериментальные данные по влиянию фторированных углеводородов на показатели пожарной опасности горючих газов в окислительных средах на основе закиси азота;

- обнаружено двойное влияние фторзамещенных углеводородных ингибиторов (ингибирующее и промотирующее) на показатели пожарной опасности смесей вида горючий газ – окислительная среда – фторзамещенный ингибитор в зависимости от вида горючего состава и вида окислительной среды, а также вида и концентрации фторированного углеводорода;

- выявлено, что изученные ингибиторы (бромистый водород, фторированные углеводороды) обладают значительно меньшей флегматизирующей способностью по отношению к горючим смесям с закисью азота в качестве окислителя, чем в случае смесей с воздухом и азотокислородными составами с повышенным содержанием кислорода;

- впервые показано, что в присутствии небольших (около 1,0 об.) добавок горючих водородсодержащих газов (метан или водород) возможно распространение пламени в смесях вида закись азота – фторированный углеводород;

- получена новая формула, позволяющая вычислять огнетушащие концентрации газовых агентов при их одновременной подаче в горючее и окислитель;

- предложен новый метод оценки искробезопасности конструкционных материалов, основанный на сочетании ударов и трения указанных материалов;

- обнаружено, что газовые завесы значительно менее эффективны для ограничения распространения газовых облаков, чем водяные.

Работа обладает **теоретической и практической значимостью**. Теоретическая значимость определяется положениями, характеризующими научную новизну работы. Практическая значимость характеризуется следующими положениями:

- определены характеристики пожаровзрывоопасности газовых смесей вида горючее – флегматизатор – окислительная среда (концентрационные

пределы распространения пламени, максимальное давление взрыва, скорость нарастания давления взрыва, нормальная скорость горения), необходимые для разработки систем предотвращения пожара и взрыва и систем пожаровзрывозащиты технологических процессов нефтегазовой отрасли с обращением горючих газов и паров;

- разработан государственный стандарт ГОСТ Р 58068-2018 «Конструкционные материалы. Метод испытаний на искробезопасность»;

- разработан межгосударственный стандарт ГОСТ 12.1.044-2018 «Пожароопасность веществ и материалов. Номенклатура показателей и методы их определения»;

- разработано методическое пособие «Расчет концентрационных пределов распространения пламени парогазовых смесей сложного состава», позволяющее расчетным путем определять концентрационные пределы при разработке безопасных технологических регламентов производственных процессов;

- использованы результаты работы для обеспечения пожаровзрывобезопасности предприятий нефтегазовой отрасли (при разработке проектных решений комплекса нефтеперерабатывающих и нефтехимических заводов по переработке тяжелой карбоновой нефти ОАО «Танеко», в деятельности ОАО «Газпром Газобезопасность» при оценке уровня пожарной безопасности технологических процессов предприятий газовой отрасли, организации обучения сотрудников указанных предприятий и проведении учений пожарных и спасательных подразделений); в ЦКБ «Коралл» при разработке системы флегматизации помещений, в которых невозможно устройство легкосбрасываемых конструкций;

- результаты работы использованы в учебном процессе Академии ГПС МЧС России в учебно-научном комплексе процессов горения и экологической безопасности на кафедре процессов горения.

Совокупность проведенных исследований может быть квалифицирована как **решение крупной народнохозяйственной проблемы** – повышение пожаровзрывобезопасности предприятий нефтегазовой отрасли путем использования новых средств взрывопреупреждения и взрывозащиты объектов отрасли.

Основные результаты диссертации **широко опубликованы в научной печати** (в том числе 53 работы в изданиях из перечня ВАК для публикации результатов докторских диссертаций.) и доложены на научно-технических симпозиумах, конференциях и семинарах (в том числе международных).

Автореферат достаточно полно и четко отражает основное содержание и выводы диссертационной работы.

В работе имеются следующие **недостатки**.

1. Автору следовало бы дать более детальное объяснение того, почему промотирующее действие фторированных углеводородов проявляется в наибольшей степени для околопредельных, а не для околостехиометрических смесей (главы 3 и 5 работы).

