

На правах рукописи



**ФЕЩЕНКО**

**Александр Николаевич**

**ВЛИЯНИЕ КРАТНОСТИ ПЕНЫ НА ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ  
ПОДСЛОЙНОГО ПОЖАРОТУШЕНИЯ  
СПИРТСОДЕРЖАЩИХ МОТОРНЫХ ТОПЛИВ**

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

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Москва – 2021

Работа выполнена в Академии Государственной противопожарной службы МЧС России на кафедре общей и специальной химии.

Научный руководитель: Макаров Сергей Александрович  
кандидат технических наук

Официальные оппоненты: Демехин Феликс Владимирович,  
доктор технических наук,  
РОО «Коллегия пожарных экспертов»,  
председатель

Корольченко Дмитрий Александрович,  
кандидат технических наук, доцент,  
ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский  
Московский государственный университет»,  
заведующий кафедрой комплексной безопасности  
в строительстве

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Уральский институт ГПС МЧС  
России»

Защита диссертации состоится «30» марта 2021 г. в 14 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д 205.002.02 в Академии государственной противопожарной службы МЧС России по адресу: 129366, г. Москва, ул. Б. Галушкина, 4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Академии ГПС МЧС России и на сайте:

<https://academygps.ru/upload/iblock/d59/d59481802b0f9a84d279ab39498016b4.pdf>

Автореферат разослан «27» января 2021 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Сивенков Андрей Борисович

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** Увеличение количества автотранспорта заметно осложняет экологическую обстановку в мире, что определяет необходимость проведения многочисленных исследований, направленных на совершенствование компонентного состава топлив двигателей внутреннего сгорания для снижения негативных воздействий на окружающую среду. Одним из наиболее известных способов улучшения экологического качества топлив является применение различных спиртосодержащих оксигенатов.

Низкомолекулярные спирты в качестве антидетонационной присадки позволяют уменьшить токсичность выхлопных газов. Применение оксигенатов регламентировано Техническим регламентом Таможенного союза «О требованиях к автомобильному и авиационному бензину, дизельному и судовому топливу, топливу для реактивных двигателей и мазуту» (ТР ТС-013-2011). Постепенное увеличение спирта в составе бензинов более высоких экологических классов сопровождается снижением эффективности их пенного пожаротушения. Спирт, как полярная жидкость, является сильным пеногасителем и обладает гораздо большим сродством к воде, чем к неполярной органической структуре бензина.

В процессе взаимодействия со спиртосодержащим бензином пена, основу которой составляет вода, будет абсорбировать спирт, инактивирующий растворенные поверхностно-активные вещества. В соответствии с Федеральным законом №123-ФЗ «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности» огнетушащее вещество должно обеспечить ликвидацию горения с использованием определенной тактики тушения и применяться для тушения пожара материалов, взаимодействие с которыми не приводит к опасности возникновения новых очагов пожара. Актуальность работы обусловлена широким распространением подслоной системы пожаротушения в вертикальных стальных резервуарах (РВС) и вопросами, связанными с возможностью ее применения для ликвидации пламенного горения топлив, содержащих в своем составе спирт. Именно при подслоной подаче происходит существенное пеногашение, сопровождающееся снижением кратности. Поэтому требуется установить условия, при которых пена, обедненная активным компонентом, будет сохранять физическое состояние, достаточное для подъема на поверхность спиртосодержащего моторного топлива (СМТ) и его эффективного тушения.

**Степень разработанности темы исследования.** Настоящая работа является продолжением исследований, выполненных в Академии ГПС МЧС России и ФГБУ ВНИИПО МЧС России.

Первые опыты по изучению процесса тушения пламени нефти и нефтепродуктов на основе технологии перемешивания воздуха были выполнены в 1953 году сотрудниками ВНИИПО Я.В. Суховым

и П.П. Павловым. Воздух подавался непосредственно в основание резервуара. Технология показала настолько высокую эффективность, что в конце 1950-х годов к ее доработке подключились такие ученые, как В.И. Блинов, Г.Н. Худяков, В.Ч. Реутт и И.И. Петров.

Толчком для разработки системы подслоного пожаротушения явилось начало коммерческого выпуска фторорганических поверхностно-активных веществ в начале 1960-х годов. Система фактически объединила высокую огнетушащую эффективность фторсодержащих пенообразователей и охлаждающую способность технологии перемешивания, которое происходит в результате реализации самого способа. Научные работы по определению эффективности пенного пожаротушения различных горючих жидкостей начали проводиться во ВНИИПО МВД СССР под руководством А.Н. Баратова, А.Ф. Шароварникова, Ю.Н. Шебеко, И.А. Болодьяна, И.Ф. Безродного и др. Более детальными исследованиями вопросов подслоного пожаротушения занимались В.П. Молчанов, С.С. Воевода, Д.А. Корольченко. Однако впервые на проблему подслоного пожаротушения спиртосодержащих топлив обратил внимание С.А. Шароварников. Под руководством А.Я. Корольченко им была выполнена работа, показывающая частичное сохранение огнетушащих свойств пены после прохождения через слой спиртосодержащего топлива. Установлено, что эффективность тушения снижается пропорционально увеличению концентрации спиртового компонента в составе топлива. Более поздние работы, посвященные исследованиям пенного пожаротушения СМТ, выполнены Д.Л. Бастриковым и М.И. Саутиевым под руководством В.П. Молчанова.

В основе теории и разработанных требований к пенообразователям для подслоного пожаротушения лежит высокая пленкообразующая способность пены, которая, в свою очередь, усиливается при снижении кратности. Фактически, для реализации технологии, нужна минимальная кратность, при которой плотность пены меньше плотности нефтепродукта. Однако минимизация кратности допустима, если в горючей жидкости отсутствуют спиртовые компоненты, снижающие кратность пены и увеличивающие ее плотность. В противном случае подъемной силы может быть недостаточно для реализации подслоного способа подачи. Существующие в настоящее время методики не позволяют оценить пригодность применяемой пены для реализации подслоного тушения СМТ.

Таким образом, **целью работы** являлось определение требуемой кратности пены для подслоного тушения пожаров СМТ в РВС.

Для достижения поставленной цели необходимо решить **следующие задачи**:

1. Выполнить экспериментальные исследования по определению времени тушения подслоным способом СМТ в зависимости от интенсивности подачи пены с оценкой влияния ее кратности на минимальный и максимальный удельный расход рабочего раствора пенообразователя.

2. Экспериментально определить кратность пены в зависимости от концентрации спирта в рабочем растворе пенообразователя с оценкой сохранения его пенообразующей способности.

3. Получить эмпирические зависимости для определения удельного расхода и требуемой кратности пены при подслоном способе пожаротушения СМТ в РВС.

**Объект исследования** – процесс подслоного пенного пожаротушения СМТ в РВС.

**Предмет исследования** – кратность пены.

**Научная новизна работы:**

– разработаны методика определения основных параметров тушения СМТ подслоным способом и экспериментальная установка, позволяющая контролировать кратность пены в течение всего времени проведения эксперимента;

– установлено влияние концентрации спирта в СМТ на кратность пены в зависимости от коэффициента разрушения пены. Повышение объемной доли спирта в СМТ на каждый процент приводит к снижению кратности пены на величину от 4 до 8 %;

– выявлено, что кратность пены, при которой достигается минимальный удельный расход рабочего раствора пенообразователя, изменяется пропорционально массовой доли кислорода в СМТ. С увеличением массовой доли кислорода от 0 до 2,7 % происходит смещение диапазонов оптимальной кратности с 3 до 6 единиц соответственно;

– впервые получены эмпирические зависимости для расчетов минимального удельного расхода рабочего раствора пенообразователя и кратности пены в зависимости от плотности СМТ, концентрации спирта в СМТ, коэффициента разрушения пены и высоты резервуара.

**Теоретическая и практическая значимость работы** заключается:

– в расширении представлений о причинах снижения огнетушащей эффективности пены при подслоном тушении СМТ;

– в возможности использования разработанной методики измерения кратности пены внутри подводящих трубопроводов для испытаний высоконапорных пеногенераторов;

– в использовании полученных эмпирических зависимостей для определения основных параметров тушения и требуемой кратности пены.

**Методология и методы исследования.** Для решения поставленных задач в работе использованы методы статистического анализа, наблюдения и сравнения, выявления закономерностей, экспериментального исследования, описания, обобщения, а также методы исследования, установленные нормативными документами.

**Положения, выносимые на защиту:**

– результаты экспериментальных исследований по определению огнетушащей эффективности пены различной кратности, применяемой для подслоного тушения СМТ;

- результаты экспериментальных исследований по определению пенообразующей способности рабочих растворов, содержащих спирт;
- эмпирические зависимости по определению удельного расхода и кратности пены для тушения СМТ в РВС.

**Степень достоверности полученных результатов и выводов,** сформулированных в диссертации, подтверждается: использованием поверенных средств измерений и аттестованного испытательного оборудования на базе существующих стандартизованных методик; применением для обработки полученных экспериментальных данных апробированных методов статистического анализа; внутренней непротиворечивостью результатов и их согласованностью с данными других исследователей.

**Материалы диссертации реализованы:**

- при разработке порядка применения фторсодержащих пенообразователей, выпускаемых на предприятии ООО «Компания «ЮГРОСПРОМ» для тушения пожаров автомобильных бензинов экологического класса К4 и К5;

- при разработке ООО «НИИ Транснефть» изменений к нормативным документам ПАО «Транснефть»:

- 1) изменение № 1 к ОТТ-13.220.10-КТН-115-12 «Магистральный трубопроводный транспорт нефти и нефтепродуктов. Пенообразователи для тушения пожаров нефти и нефтепродуктов. Общие технические требования»;

- 2) изменение № 1 к ОР-13.220.10-КТН-008-16 «Магистральный трубопроводный транспорт нефти и нефтепродуктов. Пенообразователи для тушения пожаров нефти и нефтепродуктов. Порядок проведения испытаний»;

- при проведении ООО «СЕРВИССНАБГАЗ» испытаний генераторов пены низкой кратности «Феникс» для подслоного тушения резервуаров;

- при разработке учебно-методических материалов для проведения практических и лабораторных работ по дисциплине «Химия» для обучающихся по направлению подготовки 20.03.01 «Техносферная безопасность»;

- при оценке показателей качества пенообразователей целевого назначения, выпускаемых ООО «Эгида ПТВ», для тушения спиртосодержащих моторных топлив.

**Основные результаты диссертационной работы доложены на:** второй межвузовской научно-практической конференции «Актуальные вопросы естествознания» (г. Иваново, Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, 2017); Двадцать шестой международной научно-технической конференции «Системы безопасности – 2017» (г. Москва, Академия ГПС МЧС России, 2017); VII международной научно-практической конференции молодых ученых и специалистов «Проблемы техносферной безопасности – 2018» (г. Москва, Академия ГПС МЧС России, 2018); V научно-практической конференции «Актуальные вопросы совершенствования

инженерных систем обеспечения пожарной безопасности объектов» (г. Иваново, Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, 2018 г.).

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 10 научных работ, в том числе 5 – в рецензируемых научных изданиях, включенных в перечень ВАК России для публикации основных результатов диссертации на соискание ученой степени кандидата наук.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы и двух приложений. Содержание работы изложено на 136 страницах машинописного текста, включает в себя 5 таблиц, 40 рисунков, список литературы из 137 наименований.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи исследования, проанализированы объект и предмет исследования, показана научная новизна работы и ее практическая значимость, изложены основные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе «Современное состояние проблемы влияния кратности пены на основные параметры пенного пожаротушения»** представлен анализ литературных источников по теме исследования. Представлен обзор крупных пожаров в резервуарах с нефтью и нефтепродуктами, произошедших за последнее десятилетие. Сделан обзор исследований эффективности пенного пожаротушения горючих жидкостей с использованием пены различной кратности. Проанализировано применение различных средств и способов подачи пены. Рассмотрены теоретические основы процессов образования и разрушения пены. Выполнен анализ действующих нормативных документов, регламентирующих технические требования и методы испытаний пеногенераторов и пенообразователей.

Анализ литературных источников свидетельствует о широком применении пены в качестве огнетушащего вещества для тушения пожаров нефти и нефтепродуктов в РВС, а также о существенном влиянии ее кратности на эффективность тушения. Применительно к теме настоящего исследования выявлено, что ранее полученные экспериментальные данные выполненных работ получены в основном с применением методики ГОСТ Р 53280.2-2010 «Установки пожаротушения автоматические. Огнетушащие вещества. Часть 2. Пенообразователи для подслоного тушения пожаров нефти и нефтепродуктов в резервуарах. Общие технические требования и методы испытаний». Исследования по данной методике связаны с рядом трудностей, которые не так заметны при проведении испытаний, где время тушения находится в диапазоне от 33 до 43 с. Указанная методика предполагает тушение пеной, которая приготавливается заранее в электромеханическом устройстве. Пена заливается в разъемный герметичный контейнер, откуда вытесняется в

трубопровод сжатым воздухом после закрытия контейнера. Подъем пены происходит с глубины, не превышающей 0,15 м.

В течение всего времени тушения происходит процесс синерезиса, сопровождающийся увеличением кратности пены, а количество выделенного рабочего раствора в отдельных случаях превышает 50 % от исходной массы пены. При исследовании процесса тушения спиртосодержащих топлив не рационально применять данную методику по причине более высоких значений времени подачи и отсутствия возможности повысить устойчивость пены без изменения состава пенообразователя.

В НПБ 304-2001 «Пенообразователи для тушения пожаров. Общие технические требования и методы испытаний» представлена методика определения эффективности подслоного тушения, где образование пены происходит одновременно с ее подачей, минимизируя ее разрушение. Подъем пены происходит с глубины 1 м, что позволяет более полно учитывать процессы, связанные с взаимодействием пены и горючей жидкости. Несмотря на очевидные преимущества, методика не позволяет производить изменение кратности пены и определять ее значение во время проведения эксперимента. При использовании указанной методики значение кратности пены устанавливается до или после испытаний по тушению весовым способом. Для расчета требуемых значений измеряются масса и объем пены, которая подается в мерную емкость. Способы подачи пены в мерную емкость также различаются. Пену можно подать снизу и сверху, направляя струю в дно или в стенку емкости. От соударения происходит дополнительное перемешивание внутри мерной емкости, сопровождающееся образованием более высокой кратности, чем была в подводящем трубопроводе. Разница полученных значений для пены средней кратности не так заметна, как для пены низкой кратности. Используя весовой способ, кратность пены определяют на средних значениях рабочего давления, либо на каком-то диапазоне давлений. Таким образом значение измеренной кратности отличается от фактической кратности пены, используемой для тушения.

Напорно-расходные характеристики генераторов пены низкой кратности для подслоной подачи находятся в достаточно широком диапазоне давлений, при этом внутри подводящего трубопровода создается противодействие, также влияющее на кратность. Выполненные работы не дают ответа на вопрос о величине соотношения между реальной кратностью пены в трубопроводе и кратностью, измеренной весовым способом. Более приемлемым вариантом определения кратности является ее расчет по измеренным значениям количества поданного воздуха и рабочего раствора пенообразователя. Это дает возможность определить кратность пены, если она свободно выходит из трубопровода и отсутствует противодействие.

Для разработки методики определения кратности пены внутри подводящих трубопроводов в режиме реального времени возможно совместить способ определения кратности по значениям количества рабочего раствора и воздуха со способом измерения удельной электропроводности пены, который



был впервые предложен В.К. Тихомировым и далее использовался в работах А.Ф. Шароварникова, Е.В. Кокорева и С.С. Воеводы. При этом весовой способ может использоваться в качестве калибровочного.

Результаты анализа литературных источников показали, что кратность пены существенно влияет на эффективность подслоного пожаротушения горючих жидкостей. При этом в ряде работ указывается на то, что снижение кратности пены ниже 3 единиц повышает эффективность подслоного пожаротушения углеводородов. В других исследованиях, наоборот, эффективность подслоного пожаротушения увеличивается одновременно с ростом кратности пены.

Исследования подслоного тушения СМТ свидетельствуют о взаимодействии пены со спиртом в топливе. Одним из показателей, который характеризует эффективность пенообразователя, является контактная устойчивость пены, приготовленная на его основе. Впервые измерения контактной устойчивости пены начали проводить при определении пригодности пенообразователей для тушения спиртов. Затем этот параметр использовался применительно к спиртосодержащим топливам. Несмотря на то, что контактная устойчивость пены определялась на поверхности спиртосодержащего топлива, удалось связать этот параметр с изменением основных параметров подслоного тушения. В последних работах отмечены отдельные положения, по которым происходит экстракционное взаимодействие смесей водорастворимых и водонерастворимых горючих жидкостей с водой и рабочими растворами пенообразователей. Экстракционное взаимодействие происходит в соответствии с законом распределения Нернста. Коэффициент Нернста показывает как происходит распределение спирта между пеной и спиртосодержащим топливом. В свою очередь, спирт является сильным пеногасителем. Несмотря на явную связь между кратностью пены, экстракционным взаимодействием, пеногашением и эффективностью подслоного пожаротушения СМТ, работы в этом направлении отсутствуют, что позволило сформулировать цель и задачи дальнейшего исследования.

**Вторая глава «Экспериментальные исследования по определению основных параметров тушения спиртосодержащих моторных топлив подслоным способом»** содержит характеристики используемых в работе веществ, описания применяемых известных и разработанных методик, а также результаты выполненных экспериментальных исследований.

Для создания ряда модельных спиртосодержащих бензинов в соответствии с ТР ТС-013-2011, который устанавливает требования к соотношению по объемной доле добавки и массовой доле кислорода в топливе, предложены расчетные формулы:

$$\varphi_{\text{O}} = \frac{\omega_{\text{o}} A \rho_{\text{OKC}}}{\rho_{\text{OKC}} A + \rho_{\text{Г}} (1 - A)}; \quad (1)$$

$$\omega_o = \frac{Ar(O)}{M_{r(окс)}} 100\%, \quad (2)$$

где  $\omega_o$  – массовая доля кислорода в модельном топливе, %;

$A$  – объемная доля оксигената, доли;

$\rho_{окс}$  – плотность оксигената, кг/м<sup>3</sup>;

$\rho_r$  – плотность углеводородного компонента, кг/м<sup>3</sup>;

$\omega_o$  – массовая доля кислорода в оксигенате, %;

$Ar(O)$  – относительная атомная масса кислорода;

$M_{r(окс)}$  – относительная молекулярная масса оксигената.

В качестве спиртового компонента использовался изопропиловый спирт как наиболее агрессивный к пене оксигенат. Соотношение объемных долей в модельных топливах представлено в таблице 1.

Таблица 1 – Соотношение компонентов в модельном топливе

Модельное топливо	Соотношение компонентов в модельном топливе				Массовая доля кислорода, %
	Объемная доля, % (об.)		Массовая доля, % (масс.)		
	Изопропиловый спирт	Прямогонный бензин	Изопропиловый спирт	Прямогонный бензин	
СМТ №1	0,0	100,0	0,0	100,0	0,00
СМТ №2	5,0	95,0	5,5	94,5	1,48
СМТ №3	7,5	92,5	8,3	91,7	2,21
СМТ №4	10,0	90,0	11,0	89,0	2,94

В соответствии с ГОСТ Р 53280.2-2010 для подслоного пожаротушения РВС применяются пенообразователи типа АFFF. В настоящей работе для приготовления рабочих растворов использовались два образца пенообразователей типа АFFF, соответствующих ГОСТ Р 50588-2012 «Пенообразователи для тушения пожаров. Общие технические требования и методы испытаний» и ГОСТ Р 53280.2-2010, а также два образца пенообразователей типа АFFF/AR и АFFF/AR-LV. Спиртоустойчивые пенообразователи испытывались для определения возможности их применения в подслоном пожаротушении СМТ. Пенообразователи различных типов были пронумерованы. Образцам пенообразователей типа АFFF присвоены соответственно №1 и №4, образцу пенообразователя типа АFFF/AR-LV – №2, образцу пенообразователя типа АFFF/AR – №3.

Для решения первой поставленной в работе задачи, разработана методика определения времени тушения СМТ в зависимости от интенсивности подачи пены заданной кратности подслоным способом, в основу которой вошли положения методики, приведенной в НПБ 304-2001. Для обеспечения требуемого диапазона интенсивностей подачи пены использовалось четыре

съемных круглых противня модельного очага (внутренний диаметр 1,00, 1,20, 1,40, 1,58 м) и два модельных пеногенератора (расход по рабочему раствору для первого – от 0,038 до 0,051 л/с, для второго – от 0,050 до 0,095 л/с). Таким образом обеспечивалась подача пены в диапазоне интенсивностей от 0,019 до 0,121 кг/(м<sup>2</sup>с). Пена подавалась в основание модельного очага (рисунок 1), из стандартной насосной установки по ГОСТ Р 50588-2012.

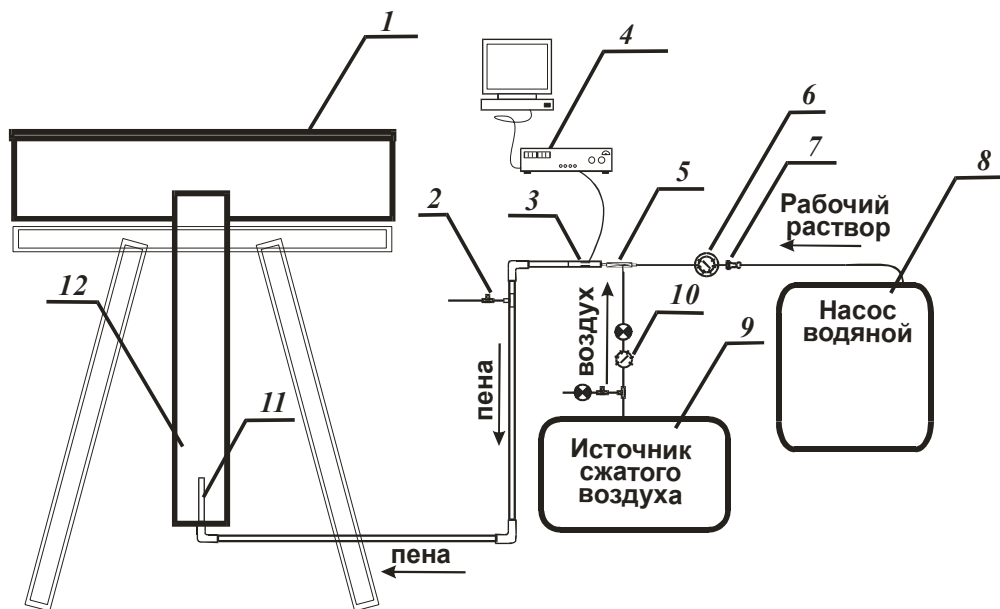


Рисунок 1 – Принципиальная схема модельного очага экспериментальной установки: 1 – круглый противень модельного очага; 2 – шаровой кран; 3 – электроды; 4 – измерительное устройство; 5 – пеногенератор; 6 – манометр жидкостный; 7 – расходомер жидкостный; 8 – насос водяной; 9 – источник сжатого воздуха; 10 – манометр газовый; 11 – насадка; 12 – основание модельного очага

Давление рабочего раствора на входе находилось в диапазоне от 7,1 до 9,2 атм. Формирование требуемой кратности пены происходило за счет принудительной подачи воздуха в модельный пеногенератор. Для определения кратности пены внутри трубопровода использовался принцип увеличения электросопротивления пены пропорционально увеличению ее кратности. По соотношению значений удельной электропроводности рабочего раствора пенообразователя и удельной электропроводности пены контролировалось значение кратности в режиме реального времени. Калибровка ячейки производилась заранее по расходу рабочего раствора и воздуха. Время свободного горения составляло 60 с. Затем измерялось время с момента начала подачи пены до момента прекращения пламенного горения.

Перед выполнением серии экспериментальных исследований огнетушащей эффективности пены проведены предварительные испытания четырех образцов пенообразователей, в соответствии с требованиями НПБ 304-2001 (таблица 2).

Таблица 2 – Результаты испытаний по определению времени тушения СМТ при подаче пены в слой горючей жидкости

Пенообразователь		Время тушения модельного топлива при интенсивности подачи пены 0,042 кг/(м <sup>2</sup> ·с), с	
Номер образца ПО	Тип ПО	СМТ №1	СМТ №4
ПО №1	AFFF	98	219
ПО №2	AFFF/AR-LV	88	284
ПО №3	AFFF/AR	107	тушения нет
ПО №4	AFFF	103	тушения нет
ПО №1	AFFF	95	203
ПО №2	AFFF/AR-LV	92	291
ПО №3	AFFF/AR	113	298
ПО №4	AFFF	99	тушения нет

На рисунке 2 представлены фрагменты подслоного тушения спиртосодержащего СМТ № 4 пеной на основе пенообразователей типа AFFF на 300-ой секунде подачи пены.



а)



б)

Рисунок 2 – Фрагменты тушения СМТ №4:

а) пенообразователь ПО №1; б) пенообразователь ПО №4

По результатам предварительных испытаний установлено, что все типы пенообразователей соответствуют требованиям НПБ 304-2001, в соответствии с которыми время тушения прямогонного бензина не должно превышать 120 с. Наиболее эффективным по показателю времени тушения от интенсивности подачи пены является пенообразователь типа AFFF/AR-LV, наименее эффективным – пенообразователь типа AFFF/AR. Для пенообразователей типа AFFF время тушения не превышало 100 с.

При тушении СМТ наилучшую эффективность показал пенообразователь ПО №1, наихудшую – пенообразователь ПО №4. С учетом того, что образцы пенообразователей ПО №1 и ПО №4 относятся к одному типу регламентированному стандартом ГОСТ Р 53280.2, а применение пенообразователей ПО №2 и ПО №3 не гарантирует эффективного тушения СМТ подслоным способом, дальнейшие исследования проводились с использованием ПО №1 и ПО №4.

Все эксперименты с использованием пенообразователя ПО №4 при объемной доле спирта в СМТ 10 % оказались неудачными. Поэтому пенообразователь ПО №4 исследован в отношении тушения СМТ с объемной долей спирта от 0 до 7,5 %. Для пенообразователя ПО №1 получены результаты тушения СМТ с объемной долей спирта от 0 до 10 %.

В качестве примера на рисунке 3 представлены экспериментальные зависимости времени тушения и удельного расхода от интенсивности подачи пены, полученной из ПО №1 и ПО №4.

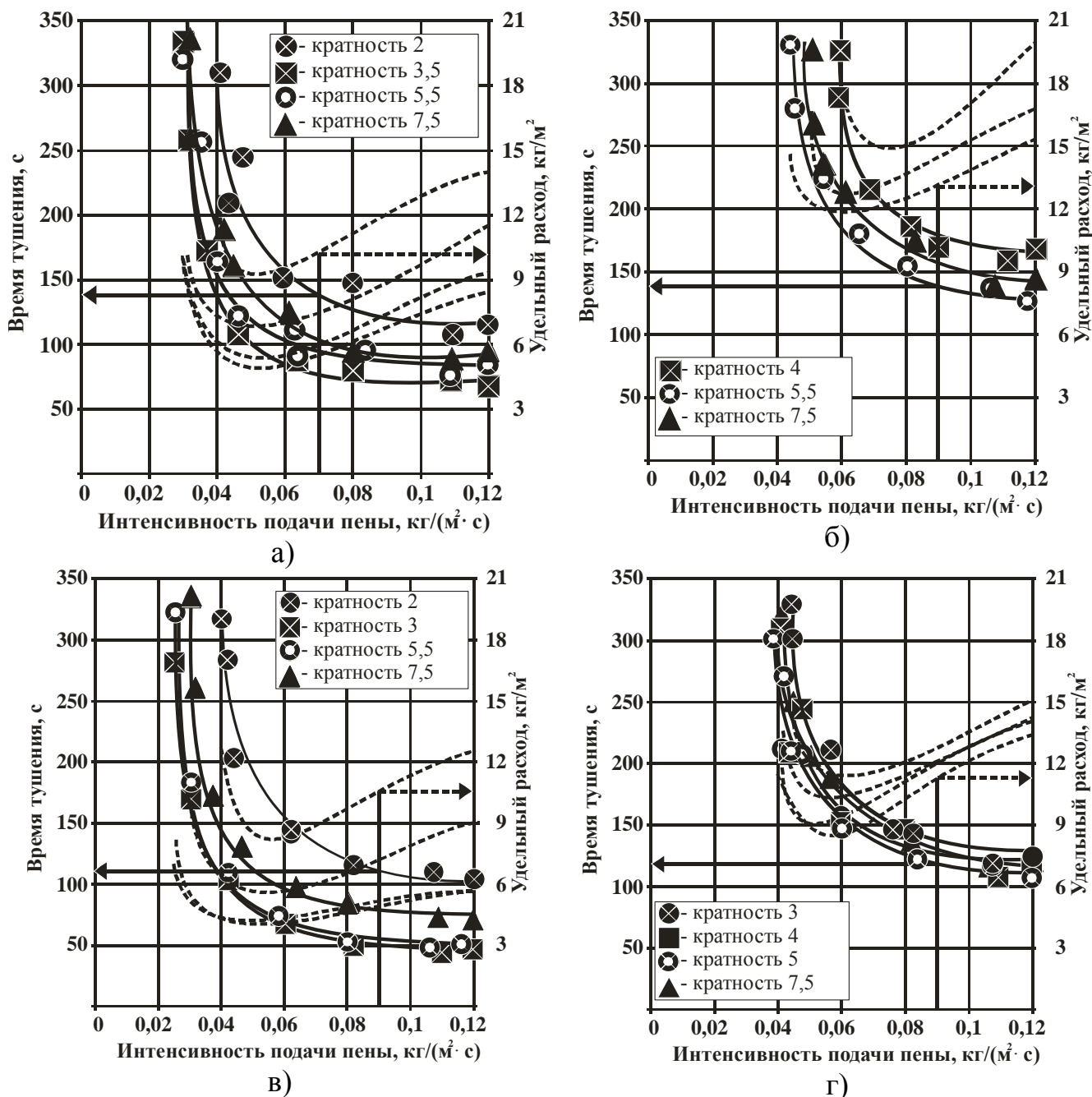


Рисунок 3 – Зависимости времени тушения и удельного расхода от интенсивности подачи пены: а) при тушении СМТ №1 пенообразователем ПО №4; б) при тушении СМТ №3 пенообразователем ПО №4; в) при тушении СМТ №1 пенообразователем ПО №1; г) при тушении СМТ №4 пенообразователем ПО №1; — интенсивность; - - - - удельный расход

Представленные на рисунке 3 зависимости времени тушения от интенсивности подачи пены имеют традиционный вид экспоненциальной кривой, которая по мере увеличения интенсивности подачи пены, достигнув определенной величины, остается далее практически неизменной. Зависимости удельного расхода от интенсивности подачи пены также имеют традиционный вид кривых с точкой экстремума, соответствующего интенсивности, при которой достигается минимальный удельный расход рабочего раствора пенообразователя. С увеличением концентрации спирта в топливе минимальный удельный расход смещается в сторону более высоких интенсивностей.

Для решения второй научной задачи предложена методика, основанная на известном принципе снижения пенообразования в присутствии антивспенивателя и сравнении полученных значений с обычным пенообразованием. Аналогичные методики широко используются в народном хозяйстве для оценки пеногасящей способности антивспенивателей. В используемой методике образование пены происходит в электромеханическом устройстве принципиальная схема которого приведена в ГОСТ Р 53280.2-2010. Зависимости кратности пены от содержания спирта в рабочем растворе пенообразователя представлены на рисунке 4.

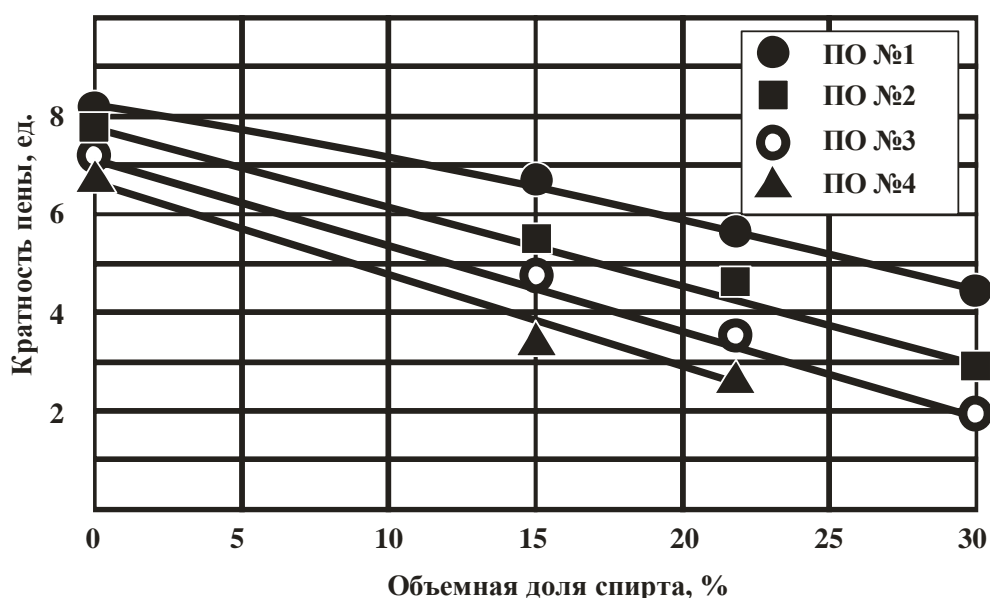


Рисунок 4 – Зависимости кратности пены от содержания спирта в рабочем растворе пенообразователя

Спирт в качестве антивспенивателя содержится непосредственно в рабочем растворе пенообразователя в концентрации, соответствующей максимальному количеству спирта, которое способен экстрагировать рабочий раствор из модельного топлива с учетом коэффициента распределения Нернста  $K_H = 2,9 \pm 0,2$ . Спиртосодержащий рабочий раствор пенообразователя в объеме 100 мл заливается в прозрачный стакан электромеханического устройства. Пена взбивается в течение 30 с. По мерным делениям в стакане определена кратность пены.

**Третья глава «Анализ результатов экспериментальных исследований по определению основных параметров тушения спиртосодержащих моторных топлив подслоинным способом»** посвящена выявлению связи между величиной кратности пены и основными параметрами подслоинного пожаротушения в зависимости от пенообразующих свойств используемого пенообразователя.

Результаты экспериментальных исследований по определению времени тушения и удельного расхода от интенсивности подачи пены выявили существенные различия в огнетушащей эффективности пенообразователей ПО №1 и ПО №4 при тушении СМТ несмотря на то, что они относятся к одному типу пенообразователей AFFF (таблица 3 и 4).

Таблица 3 – Экспериментальные данные кратности пены и удельного расхода рабочего раствора пенообразователя ПО №1 для тушения СМТ

Модельное топливо	Кратность пены, ед.	Среднее значение удельного расхода, кг·м <sup>-2</sup>
СМТ №1	1,9-2,2	8,6
	2,9-3,2	4,2
	4,9-5,2	4,2
	7,3-7,7	6,1
СМТ №2	1,9-2,2	9,6
	3,3-3,6	5,4
	4,9-5,2	5,6
	7,3-7,7	7,3
СМТ №3	2,4-2,7	9,9
	3,9-4,2	7,3
	4,9-5,2	7,4
	7,3-7,7	8,5
СМТ №4	2,9-3,2	11,3
	3,9-4,2	9,1
	5,3-5,6	8,8
	7,3-7,7	10,2

Таблица 4 – Экспериментальные данные кратности пены и удельного расхода рабочего раствора пенообразователя ПО №4 для тушения СМТ

Модельное топливо	Кратность пены, ед.	Среднее значение удельного расхода, кг·м <sup>-2</sup>
СМТ №1	1,9-2,2	9,1
	3,3-3,6	5,2
	5,3-5,6	5,6
	7,4-7,8	7,3
СМТ №2	2,9-3,2	11,8
	4,4-5,6	8,7
	5,9-6,2	9,1
	7,3-7,7	10,2
СМТ №3	3,9-4,2	15,0
	5,3-5,6	11,7
	6,5-7,7	12,9

С использованием пенообразователя ПО №4 не удалось произвести успешного тушения СМТ №4, содержащего 10 % (об.) изопропилового спирта даже при интенсивности подачи, превышающей нормативную. При этом воздушно-механическая пена на основе пенообразователя ПО №4 способна произвести тушение СМТ, содержащего до 7,5 % (об.) спирта. Пена, полученная на основе пенообразователя ПО №1, потушила все модельные топлива. Для выявления связи минимального удельного расхода ( $Q$ ) с кратностью пены ( $K$ ) и содержанием спиртового компонента ( $C$ ) получены зависимости (3) и (4) соответственно для пенообразователей ПО №4 и ПО №1:

$$Q(K, C) = 15,47 - 4,208K + 0,9267C + 0,4139K^2 - 0,1166 KC + 0,0954 C^2; \quad (3)$$

$$Q(K, C) = 14,4 - 4,263K + 0,2411C + 0,4211K^2 - 0,0289 KC + 0,0412 C^2. \quad (4)$$

Среднее квадратичное отклонение соответственно составляло 0,97 и 0,92. Полученные зависимости могут быть использованы для расчета значений минимального удельного расхода пены в границах кратности от 2 до 8 при концентрации спирта от 0 до 10 % (об.).

Используя программное обеспечение *MATLAB* по зависимостям (3) и (4) построены трехмерные поверхности  $Q(K, C)$ , общий вид которых представлен на рисунке 5.

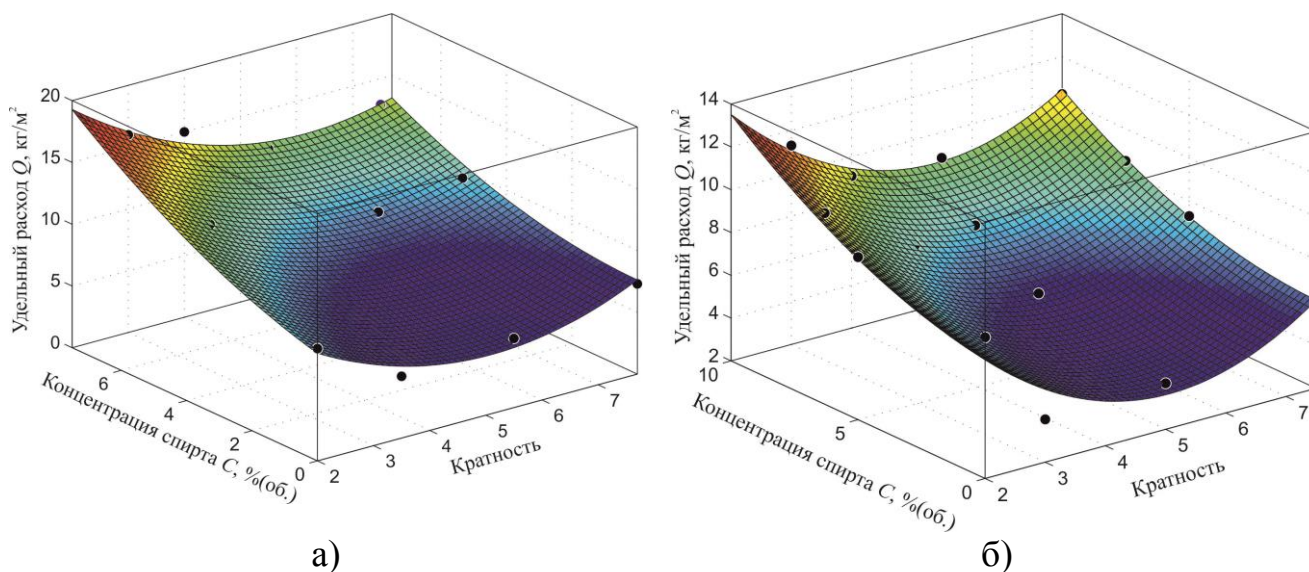


Рисунок 5 – Зависимость минимального удельного расхода от кратности пены и концентрации спиртового компонента в модельном топливе при тушении пенообразователем: а) ПО №4, б) ПО №1

Проведенные экспериментальные исследования по определению влияния содержания спирта в рабочих растворах пенообразователей на сохранение их пенообразующей способности показывают, что снижение кратности пены происходит пропорционально увеличению объемной доли спирта в рабочем растворе пенообразователя. Максимальное снижение кратности пены



установлено для объемной доли спирта в рабочем растворе пенообразователя 30 %, что ориентировочно соответствует подслоной подаче в СМТ с объемной долей спирта 10 %. Снижение пенообразующей способности рабочих растворов пенообразователей удовлетворительно согласуется со снижением огнетушащей эффективности пены, приготовленной на их основе. Также как и в огневых экспериментах, наиболее эффективным по сохранению своей пенообразующей способности был пенообразователь ПО №1, наименее эффективным – пенообразователь ПО №4. При объемной доле спирта 30 % в рабочем растворе пенообразователя ПО №4 формируется пеноэмульсия, которая быстро разрушается с образованием водно-спиртового слоя, что и объясняет невозможность тушения СМТ №4 подачей пены на основе пенообразователя ПО №4. Численные значения кратности пены от содержания спирта в рабочем растворе пенообразователя выражаются соотношением:

$$K_2 = K_1 - \alpha c K_H, \quad (5)$$

где  $K_2$  – кратность пены, полученная из рабочего раствора пенообразователя с пеногасителем;

$K_1$  – кратность пены, полученная из рабочего раствора пенообразователя без пеногасителя;

$\alpha$  – коэффициент разрушения пены (от 5 до 10);

$c$  – объемная доля спирта в топливе, доли;

$K_H$  – коэффициент распределения Нернста.

В главе представлены суждения о кратности пены для обоснования ее минимальной величины при подслоной подаче. При тушении СМТ подслоным способом необходимо обеспечить гарантированный подъем пены на поверхность горючего. Пена для подслоного пожаротушения генерируется на высоконапорных пеногенераторах, которые обеспечивают ее получение при наличии гидростатического противодействия столба горючей жидкости. Стандартизованная методика испытаний высоконапорных пеногенераторов устанавливает порядок измерения кратности полученной пены на открытом воздухе, то есть во время измерения кратности пены на нее воздействует только атмосферное давление. В работе установлена связь между кратностью пены, полученной на открытом воздухе при проведении испытаний, и фактической кратностью пены с учетом противодействия столба горючей жидкости. Для ясности описания механизма подъема пены через слой СМТ целесообразно разделить понятия кратности пены, различающиеся по своей величине в зависимости от влияния на нее избыточного внешнего давления. В данном случае столб горючей жидкости оказывает гидростатическое давление на пену (противодавление). Кратность пены без учета противодействия отличается от кратности пены с его учетом. Также сделано допущение, что давление воздуха внутри пузырей пены равно внешнему давлению. Опираясь на результаты экспериментальных исследований, сделано различие между кратностью пены, подвергшейся пеногасящему воздействию

спирта, и кратностью пены, которая с ним не взаимодействовала. За основу принималась кратность пены ( $K_{\Pi}$ ), полученная из рабочего раствора пенообразователя при атмосферном давлении (без дополнительных воздействий):

$$K_{\Pi} = \frac{V_{\Pi}}{V_p}; \quad (6)$$

$$K_{\Pi} = \frac{V_p + V_B}{V_p}, \quad (7)$$

где  $V_p$  – объем рабочего раствора пенообразователя в пене,  $\text{м}^3$ ;

$V_{\Pi}$  – объем пены,  $\text{м}^3$ ;

$V_B$  – объем воздуха в пене,  $\text{м}^3$ .

Расчет кратности производится после определения объема воздуха ( $V_B$ ) и объема рабочего раствора пенообразователя ( $V_p$ ). Если рассмотреть пену как дисперсную систему, то находящиеся в ней среды будут по-разному вести себя под воздействием внешнего избыточного давления. Изменение объема внутри воздушного пузыря происходит пропорционально изменению давления, при этом рабочий раствор пенообразователя, находящийся в пене, является несжимаемой средой. Обозначим кратность пены, находящейся под воздействием противодавления столба горючей жидкости ( $K_{\Pi 1}$ ) и выразим ее через ( $K_{\Pi}$ ):

$$K_{\Pi 1} = 1 + \frac{V_B P_{\text{атм}}}{V_p (P_{\text{ст}} + P_{\text{атм}})}; \quad (8)$$

$$K_{\Pi 1} = \frac{P_{\text{ст}} + P_{\text{атм}} K_{\Pi}}{P_{\text{ст}} + P_{\text{атм}}}. \quad (9)$$

где  $P_{\text{атм}}$  – атмосферное давление,  $\text{Н/м}^2$ ;

$P_{\text{ст}}$  – гидростатическое давление столба горючей жидкости,  $\text{Н/м}^2$ .

По формуле (9) оценивается величина кратности пены, подаваемой в основание резервуара с нефтью или иным углеводородным топливом. При подслонной подаче в СМТ происходит дополнительное снижение кратности по причине пеногасящего влияния спирта. Величина кратности пены после воздействия спирта будет зависеть от концентрации спирта в топливе, исходной кратности пены до пеногашения, а также от состава и свойств пенообразователя. Допускается, что при подъеме пена сорбирует в себя максимально возможное количество спирта в соответствии коэффициентом Нернста, а величина снижения кратности будет максимальной.

С учетом зависимости (5) кратность пены можно определить из следующего выражения:

$$K_{\Pi 2} = \frac{P_{\text{ст}} + P_{\text{атм}} K_{\Pi}}{P_{\text{ст}} + P_{\text{атм}}} - \alpha c K_H, \quad (10)$$

где  $K_{\Pi 2}$  – кратность пены, находящейся под воздействием противодавления столба горючей жидкости и содержащей пеногаситель.

Для реализации подслоного способа тушения требуется осуществить подъем пены на поверхность горючей жидкости. Подъем пены будет происходить только тогда, когда плотность пены будет меньше плотности горючей жидкости:

$$\rho_{ГЖ} > \rho_{П}, \quad (11)$$

где  $\rho_{ГЖ}$  – плотность горючей жидкости, кг/м<sup>3</sup>;

$\rho_{П} = \rho_{р-ра} / K_{П2}$  – плотность пены, кг/м<sup>3</sup>;

$\rho_{р-ра}$  – плотность рабочего раствора пенообразователя, кг/м<sup>3</sup>.

При этом изменение кратности пены и изменение плотности воздуха внутри воздушного пузыря происходит пропорционально изменению гидростатического давления столба горючей жидкости. Тогда, необходимое условие подъема пены будет описываться выражением:

$$\rho_{ГЖ} > \frac{\rho_{р-ра}}{K_{П2}} + \rho_{возд}, \quad (12)$$

где  $\rho_{возд}$  – плотность воздуха, кг/м<sup>3</sup>.

В выражении (12) плотностью воздуха пренебрегали, так как она несоизмеримо мала по сравнению с плотностью рабочего раствора пенообразователя. Тогда для подъема пены потребуется, чтобы ее кратность была не меньше отношения плотности рабочего раствора пенообразователя к плотности горючей жидкости:

$$K_{П2} > \frac{\rho_{р-ра}}{\rho_{ГЖ}}. \quad (13)$$

Из выражения (13) видно, что чем выше плотность горючей жидкости, тем меньшая кратность пены требуется для подъема. Кратность ( $K_{П2}$ ) характеризует пену, находящуюся в слое горючей жидкости, на которую оказывается гидростатическое давление и пеногасящее воздействие спирта. Для нахождения исходной кратности пены ( $K_{П}$ ), которая определяется при испытаниях высоконапорных пеногенераторов, перепишем выражение (13) с учетом выражения (10):

$$\frac{P_{ст} + P_{атм} K_{П}}{P_{ст} + P_{атм}} - acK_{Н} > \frac{\rho_{р-ра}}{\rho_{ГЖ}}. \quad (14)$$

Выразив гидростатическое давление столба горючей жидкости через плотность горючей жидкости и высоту столба горючей жидкости, получаем эмпирическую зависимость для расчета минимальной величины исходной кратности пены:

$$K_{\Pi} > \left( \frac{P_{\text{атм}} + \rho_{\text{ГЖ}} g h_{\text{ст}}}{P_{\text{атм}}} \right) \left( \frac{\rho_{\text{р-ра}}}{\rho_{\text{ГЖ}}} + \alpha c K_H \right) - \frac{\rho_{\text{ГЖ}} g h_{\text{ст}}}{P_{\text{атм}}}, \quad (15)$$

где  $g$  – ускорение свободного падения, Н/кг;

$h_{\text{ст}}$  – высота столба горючей жидкости, м.

Для визуализации и сравнения значений, полученных экспериментально со значениями минимальной кратности пены, вычисленной по выражению (15), на рисунке 6 представлены зависимости фактической кратности пены от концентрации спиртового компонента в топливе для пенообразователей ПО №1 и ПО №4.

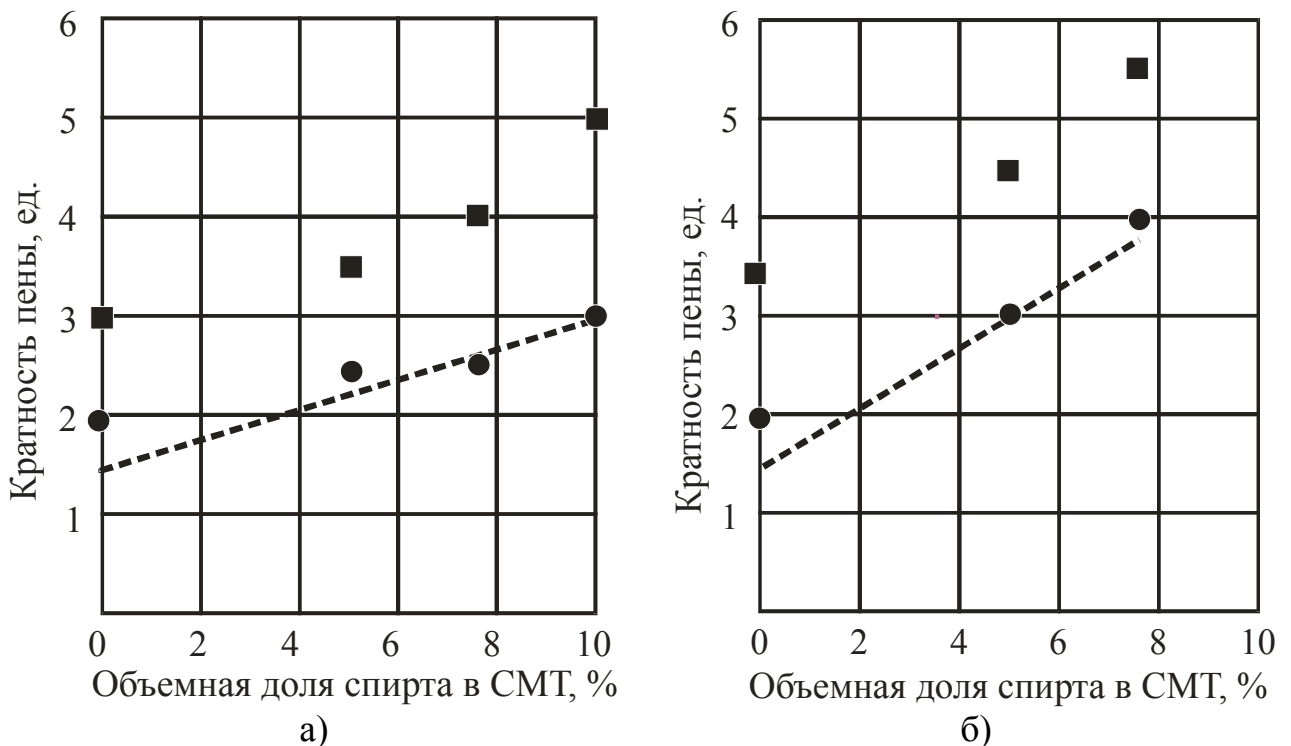


Рисунок 6 – Зависимости кратности пены от концентрации спирта в СМТ при минимальном удельном расходе пены из рабочего раствора пенообразователя:

а) ПО №1, б) ПО №4:

- – при наименьших значениях  $Q$  (см. таблицы 3 и 4);
- – при наибольших значениях  $Q$  (см. таблицы 3 и 4);
- – расчетные значения  $K_{\Pi}$  по формуле (15).

Из рисунка 6 видно, что экспериментальные данные, находящиеся в окрестностях штрихпунктирной линии, соответствуют кратности пены, минимальный удельный расход которой является самым высоким. Точки, находящиеся на 1,5–2 единицы выше штрихпунктирной линии, соответствуют кратности пены, минимальный удельный расход которой является самым низким.

На рисунках 7 и 8 представлены зависимости, показывающие возможность применения существующих высоконапорных пеногенераторов для подслоной подачи пены кратностью  $K_H = 4$  ед. при тушении СМТ в РВС.

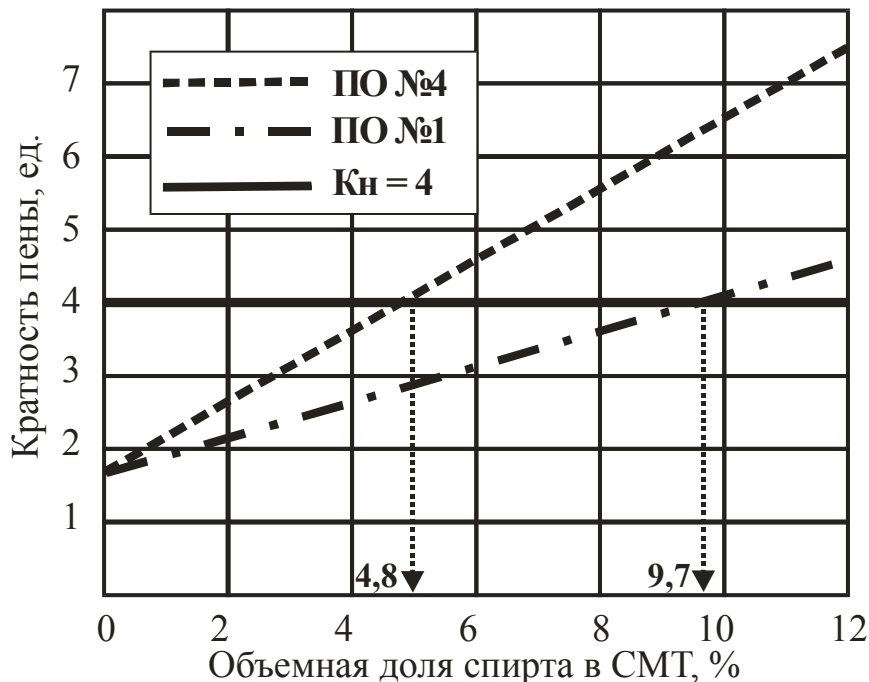


Рисунок 7 – Зависимости требуемой минимальной кратности пены на основе пенообразователей ПО №1 и ПО №4 от объемной доли спирта в СМТ для тушения резервуара с высотой стенки 12 м

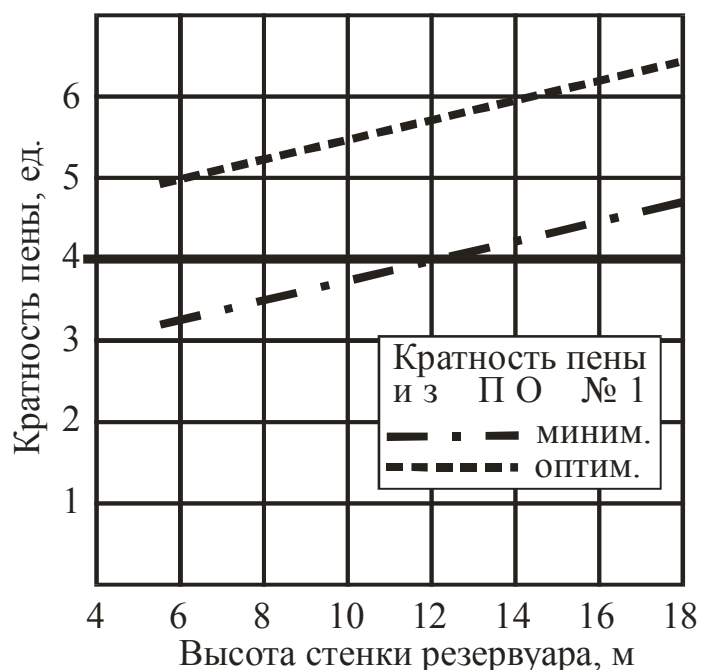


Рисунок 8 – Зависимости требуемой кратности пены из рабочего раствора ПО №1 от высоты стенки резервуара при подслоном тушении топлив с массовой долей кислорода 2,7 %

По зависимостям на рисунках 7 и 8 определяются концентрация спирта в топливе и высота стенки резервуара, при которых допускается использовать существующие установки для подслоного тушения. Результаты расчетов показывают, что для РВС с высотой стенки до 12 м возможно применение существующих установок подслоного пожаротушения, если объемная доля спирта в СМТ не превышает 4,8 %, для резервуаров с высотой стенки 18 м – объемная доля спирта в СМТ не должна превышать 3,5 %.

На рисунке 8 видно, что пересечение значения нормативной кратности пены ( $K_n=4$ ) соответствует высоте стенки резервуара 12 м. Это свидетельствует о том, что при нормативной кратности пена на основе пенообразователя ПО №1 гарантированно поднимется на поверхность горючей жидкости. Однако для обеспечения эффективного тушения требуется кратность пены не менее 5,5 ед.

**В заключении** сформулированы основные выводы и рекомендации, полученные в ходе выполнения диссертационной работы.

**В приложениях** представлены технические характеристики пенообразователей, используемых в работе, а также акты внедрения.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В результате выполненных экспериментальных исследований по определению основных параметров тушения СМТ подслоным способом установлено, что время тушения и удельный расход рабочего раствора пенообразователя зависят от кратности пены. Минимальная кратность пены должна составлять не менее 3 единиц. Установлено, что увеличение объемной доли спирта в топливе на каждый процент должно сопровождаться увеличением кратности пены на 10–15 %.

2. Анализ экспериментальных данных влияния спирта на сохранение пенообразующей способности рабочих растворов пенообразователей показал, что повышение объемной доли спирта в рабочем растворе на каждые 10 % приводит к снижению кратности пены на 15–27 %.

3. Получены эмпирические зависимости для определения удельного расхода и кратности пены, которые рекомендуются к использованию при оценке параметров высоконапорных пеногенераторов для подслоного пожаротушения. Величина минимальной кратности пены зависит от высоты РВС, коэффициента пеногашения, плотности горючей жидкости и концентрации в ней спирта. Выявлено, что область кратности пены, при которой реализуются оптимальные параметры тушения, находится на 1,5–2 единицы выше значений минимальной кратности пены.

4. Для подслоного пожаротушения СМТ с максимально допустимой массовой долей кислорода 2,7 % в РВС с высотой стенки до 12 м требуется применение пенообразователя с коэффициентом разрушения пены не более 5. Для подслоного тушения РВС с высотой стенки более 12 м дополнительно требуется генерация пены кратностью более 4-х единиц.

5. Установлено, что существующие системы подслоного пожаротушения могут использоваться для тушения СМТ с объемной долей спирта, не превышающей 3,5 %.

**Основные научные результаты работы опубликованы в следующих рецензируемых научных изданиях из перечня ВАК:**

1. Андреев, А.П. Устойчивость огнетушащей пены с добавками специального назначения [Электронный ресурс] / А.П. Андреев, В.П. Молчанов, А.Н. Фещенко // Технологии техносферной безопасности. – 2016. – № 4. – 8 с. – Режим доступа: <http://agps-2006.narod.ru/ttb/2016-4/37-04-16.ttb.pdf>.

2. Фещенко, А.Н. Определение кратности пленкообразующей пены для подслоного тушения пожаров горючих жидкостей [Текст] / С.А. Макаров, А.Н. Фещенко, В.П. Молчанов, С.С. Воевода, А.В. Третьяков // Пожаровзрывобезопасность. – 2016. – Т. 26. – № 9. – С. 65-73.

3. Фещенко, А.Н. Особенности выбора модельной горючей жидкости для исследования процесса тушения пожаров углеводородно-спиртовых топлив [Электронный ресурс] / А.Н. Фещенко, С.А. Макаров, О.К. Рахманин // Технологии техносферной безопасности. – 2017. – № 2. – 5 с. – Режим доступа: <http://agps-2006.narod.ru/ttb/2017-2/07-02-17.ttb.pdf>.

4. Макаров, С.А. Определение основных параметров пенного пожаротушения экстракционно-разделяемых спиртосодержащих моторных топлив [Электронный ресурс] / С.А. Макаров, М.И. Саутиев, А.Н. Фещенко, А.В. Третьяков, И.А. Апанасенко // Технологии техносферной безопасности. – 2017. – № 6. – 10 с. – Режим доступа: <http://agps-2006.narod.ru/ttb/2017-6/06-06-17.ttb.pdf>.

5. Фещенко, А.Н. Закономерности тушения спиртосодержащих топлив подслоным способом пеной различной кратности [Электронный ресурс] / А.Н. Фещенко // Технологии техносферной безопасности. – 2019. – № 1– 10 с. – Режим доступа: <http://agps-2006.narod.ru/ttb/2019-1/05-01-19.ttb.pdf>.

**Остальные публикации по теме диссертации:**

6. Фещенко, А.Н. Тушение спиртосодержащих моторных топлив пеной средней кратности [Текст] / А.Н. Фещенко, С.А. Макаров, М.И. Саутиев / Материалы II Межвузовской научно-практической конференции: Актуальные вопросы естествознания. – Иваново: Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, 2016. – С. 89-92.

7. Фещенко, А.Н. Обзор работ по влиянию кратности воздушно-механической пены на эффективность тушения нефти и нефтепродуктов [Текст] / А.Н. Фещенко, С.А. Макаров // Материалы VIII научно-практической конференции: Актуальные проблемы пожарной безопасности, предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций. – Кокшетау: КТИ КЧС МВД РК, 2017. – С 277-280.

8. Фещенко, А.Н. Подготовка модельного топлива для исследования процесса тушения высокооктановых бензинов [Текст] / А.Н. Фещенко, О.К. Рахманин // Материалы 26-ой международной научно-технической

конференции: Системы безопасности –2017. – М.: Академия ГПС МЧС России, 2017. – С. 262-264.

9. Фещенко, А.Н. Определение пригодности пенообразователей для подслоного пожаротушения спиртосодержащих нефтепродуктов [Текст] / А.Н. Фещенко, О.К. Рахманин // Материалы VII международной научно-практической конференции молодых ученых и специалистов: Проблемы техносферной безопасности – 2018. – М.: Академия ГПС МЧС России, 2018. – С. 37-40.

10. Фещенко, А.Н. Методика направленного регулирования кратности пены для изменения ее огнетушащей эффективности при подслоной подаче [Текст] / Фещенко А.Н., Макаров С.А., Третьяков А.В. // Материалы V научно-практической конференции: Актуальные вопросы совершенствования инженерных систем обеспечения пожарной безопасности объектов. – Иваново: Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, 2018. – С. 268-270.

Подписано в печать 20.01.2021. Формат 60×84<sup>1</sup>/<sub>16</sub>.

Печать офсетная. Усл. печ. л. 1,0. Тираж 100 экз. Заказ № 14.

---

Академия ГПС МЧС России. 129366, г. Москва, ул. Б. Галушкина, 4