

**Пустовалов Илья Андреевич**

**ПОВЫШЕНИЕ ОГNETУШАЩЕЙ СПОСОБНОСТИ  
МОДУЛЬНЫХ УСТАНОВОК ПОЖАРОТУШЕНИЯ  
ТОНКОРАСПЫЛЕННОЙ ВОДОЙ НА ОБЪЕКТАХ  
НЕФТЕГАЗОВОГО КОМПЛЕКСА**

**2.10.1. Пожарная безопасность  
(технические науки)**

**Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук**

**Санкт-Петербург – 2024**

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский университет  
ГПС МЧС России»

**Научный руководитель:** **ИВАНОВ Алексей Владимирович**  
кандидат технических наук, доцент

**Официальные оппоненты:** **ЦАРИЧЕНКО Сергей Георгиевич,**  
доктор технических наук,  
ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский  
Московский государственный строительный  
университет»  
кафедра комплексной безопасности в  
строительстве, профессор;

**ТУЖИКОВ Евгений Николаевич,**  
кандидат технических наук, доцент  
ФГБОУ ВО «Уральский институт  
ГПС МЧС России»  
кафедра пожарной, аварийно-спасательной  
техники и специальных технических средств (в  
составе УНК ПиПАСР), доцент

**Ведущая организация:** ФГБОУ ВО «Балтийский государственный  
технический университет «ВОЕНМЕХ»  
имени Д.Ф. Устинова»

Защита состоится «13» ноября 2024 года в 14:00 на заседании совета по защите докторских и кандидатских диссертаций 04.2.003.01 на базе ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России» (196105, Санкт-Петербург, Московский проспект, д. 149).

С диссертаций можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России» (196105, Санкт-Петербург, Московский проспект, д. 149) и на сайте <https://dsovet.igps.ru>

Автореферат разослан «\_\_\_» сентября 2024 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета 04.2.003.01  
кандидат технических наук, доцент

М.Р. Сытдыков

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** Большинство производственных зданий и сооружений, связанных с обращением нефтепродуктов, а также помещения для размещения оборудования автоматизированной системы управления сложными технологическими процессами, подлежат защите автоматическими установками пожаротушения. На объектах с локальным сосредоточением пожарной нагрузки предпочтительно применение модульных установок пожаротушения, обеспечивающих ликвидацию возгораний на ранней стадии. Среди различных типов модульных установок пожаротушения активно используются системы пожаротушения тонкораспыленной водой (МУПТРВ), ввиду безопасности огнетушащего состава, низкой инерционности и возможности работы в условиях недостаточного водоснабжения.

Основным огнетушащим механизмом МУПТРВ является интенсификация теплоотвода, приводящая к нарушению теплового баланса и снижению температуры ниже температуры потухания в зоне горения. Техническими ограничениями применения МУПТРВ являются малый запас огнетушащего вещества (ОТВ) и сравнительно высокие значения требуемой интенсивности подачи ОТВ. Кроме того, эффективность применения МУПТРВ на открытых пространствах резко снижается по причине уноса из зоны горения большей части капель тонкораспыленной воды конвективными потоками нагретого воздуха.

Одним из способов повышения огнетушащей способности МУПТРВ является применение модификаторов (поверхностно-активных веществ, неорганических солей и др.). Модифицирование огнетушащих составов зачастую обеспечивает снижение требуемой интенсивности подачи ОТВ, однако их присутствие повышает вероятность возникновения коррозионной активности и сокращение «времени жизни» огнетушащего состава. Это негативным образом сказывается на эксплуатационных характеристиках МУПТРВ, вследствие чего разработка новых модификаторов, а также методов их применения в целях повышения огнетушащей способности МУПТРВ за счет интенсификации теплоотвода из зоны горения, представляется весьма перспективным.

Уникальные свойства аллотропных форм углерода (фуллеренов, нанотрубок, астраленов и т.д.) позволяют интенсифицировать теплообменные процессы во многих сферах производств. Кроме того, они имеют высокий порог термической деструкции, их присутствие не способствует повышению коррозионной активности составов.

**Степень разработанности темы исследования.** Физико-химические основы процессов тушения горючих жидкостей тонкораспылённой водой заложены российскими и зарубежными учеными (Зельдович Я.Б., Семенов Н.Н., Rasbash J., Шароварников А.Ф., Горшков В.И., Думилин А.И. и др.) и заключаются в создании условий снижения температуры пламенной зоны горения

до температуры потухания за счет интенсификации теплообмена. В настоящее время в России и за рубежом активно развиваются научные исследования, направленные на повышение характеристик жидкостей за счет использования различных присадок и модификаторов, с том числе аллотропных форм углерода. До настоящего времени присадки и модификаторы на основе углеродных наноструктур (УНС) для МУПТРВ не применялись и впервые были рассмотрены в данном исследовании.

На основании вышеизложенного была сформулирована **научная задача**: научно-методическое обоснование применения термически стабильных аллотропных форм углерода для повышения огнетушащей способности модульных установок пожаротушения тонкораспыленной водой за счет интенсификации теплоотвода из пламенной зоны горения нефтепродуктов.

**Объект исследования** – огнетушащая способность модульных установок пожаротушения тонкораспыленной водой при тушении модельных очагов пожара класса «В».

**Предмет исследования** – физико-химические свойства огнетушащих составов на основе воды, модифицированной углеродными наноструктурами.

**Цель диссертационного исследования** – повышение огнетушащей способности модульных установок пожаротушения тонкораспыленной водой, содержащих ОТВ с углеродными наноструктурами, в условиях ликвидации горения нефтепродуктов.

Для достижения цели работы предполагалось решить следующие частные задачи:

1. Провести исследование физико-химических свойств огнетушащих составов на основе воды и углеродных наноструктур (астраленов), а также определить зависимости огнетушащей способности модульной установки пожаротушения тонкораспыленной водой при тушении модельного очага пожара класса «В» от концентрации наноструктур.

2. Определить аналитические зависимости огнетушащей способности модульных установок пожаротушения тонкораспыленной водой от физических свойств модифицированных огнетушащих составов.

3. Разработать методику повышения огнетушащей способности модульных установок пожаротушения тонкораспыленной водой на объектах нефтегазового комплекса с использованием механизма огнетушащего действия жидкости на основе воды с астраленами и рекомендации по её применению.

**Научная новизна результатов:**

- экспериментально определено влияние концентраций углеродных наноструктур (астраленов) на физические свойства огнетушащих составов на основе воды, влияющие на огнетушащую способность модульных установок

пожаротушения тонкораспыленной водой при тушении модельных очагов пожаров класса «В»;

- разработана регрессионная модель, отличающаяся от существующих возможностью прогнозирования времени тушения модельных очагов пожара класса «В» в условиях применения водных огнетушащих веществ, модифицированных углеродными наноструктурами в зависимости от их концентраций;

- на основе аналитических закономерностей дано обоснование возможности применения углеродных наноструктур в качестве модификаторов огнетушащих составов для модульных установок пожаротушения тонкораспылённой водой;

- научно обоснована методика повышения огнетушащей способности модульных установок пожаротушения тонкораспыленной водой на объектах нефтегазового комплекса, основанная на изменении теплофизических и реологических свойств огнетушащего вещества, отличающаяся от существующих возможностью изменения свойств огнетушащего вещества за счет диспергирования в его состав термически стабильных наноструктур.

#### **Теоретическая значимость работы:**

- получена аналитическая зависимость времени тушения модельного очага пожара класса «В» от скорости нагрева с комнатной до температуры кипения, удельной теплоты парообразования и динамической вязкости;

- выявлены диапазоны концентраций одного из видов углеродных наноструктур – астраленов, при которых обеспечивается устойчивое тушение модельных очагов пожара класса «В» тонкораспыленными огнетушащими составами на основе воды, модифицированными углеродными наноструктурами (от 0,25 до 0,5 об. % включительно);

- определены зависимости времени достижения критических параметров ОФП от теплофизических свойств огнетушащих суспензий в диапазоне концентраций наноструктур от 0,05 до 1,0 об. % в условиях моделирования процессов распространения опасных факторов пожара в программном комплексе «PyroSim».

**Практическая значимость работы** состоит в том, что применение методики повышения огнетушащей способности МУПТРВ позволит сократить время тушения пожаров на объектах защиты с обращением нефтепродуктов за счет модернизации существующих средств пожаротушения и применения в качестве огнетушащего вещества воды, модифицированной углеродными наноструктурами (астраленами) с различными концентрациями.

**Методы исследования.** В работе использованы общенаучные (эксперимент и моделирование) и специальные (испытания МУПТРВ, математическая обработка результатов) методы познания. В исследованиях применялись: пикнометрический метод, метод капиллярной вискозиметрии, метод дифференциально-сканирующей

калориметрии (ДСК), сталагмометрический метод, метод автоклавирования, метод оценки параметров капель тонкораспылённой наножидкости с использованием средств фото- и видео-фиксации, метод оценки огнетушащей способности по ГОСТ Р 53288-2009, метод корреляционно-регрессионного анализа.

**Положения, выносимые на защиту:**

1. Экспериментальные зависимости влияния концентрации углеродных наноструктур (астраленов) на физические свойства воды и огнетушащую способность модульных установок пожаротушения тонкораспыленной водой при тушении модельного очага пожара класса «В».

2. Аналитические зависимости огнетушащей способности модульных установок пожаротушения тонкораспыленной водой от свойств огнетушащей суспензии.

3. Методика повышения огнетушащей способности модульных установок пожаротушения тонкораспылённой водой на объектах нефтегазового комплекса, основанная на изменении теплофизических и реологических свойств огнетушащего вещества за счет диспергирования в его состав термически стабильных углеродных наноструктур (астраленов) и предложены рекомендации по её применению.

**Степень достоверности** научных результатов подтверждается большим массивом полученных экспериментальных данных, применением комплекса независимых и взаимодополняющих методов исследования, математической обработкой результатов с использованием общепринятых методик, их универсальностью и непротиворечивостью основным физическим и химическим законам, а также общественной апробацией научных результатов.

Положения, вынесенные на защиту, соответствуют паспорту специальности 2.10.1. Пожарная безопасность по п. 10 «Разработка научных основ, моделей и методов, направленных на создание и применение веществ и материалов пониженной горючести, средств огнезащиты и огнетушащих веществ» и п. 11 «Научное обоснование и разработка технологий тушения пожаров на объектах защиты пожарным оборудованием и мобильными средствами пожаротушения».

**Реализация работы:**

1. Экспериментальные зависимости влияния концентраций астраленов на физические свойства воды и огнетушащую способность модульных установок пожаротушения тонкораспыленной водой при тушении модельных очагов пожара класса «В» и концентрационные пределы астраленов при которых осуществляется тушение модельных очагов пожара класса «В» внедрены и учитываются в практической деятельности акционерного общества «Научно-технический центр «Прикладных нанотехнологий» при разработке технологий наномодифицирования огнетушащих суспензий углеродными наноструктурами – астраленами, с целью огнетушащей способности установок пожаротушения.

2. Методика повышения огнетушащей способности модульных установок пожаротушения тонкораспыленной водой, основанная на применении углеродных наноструктур в качестве модификаторов огнетушащего вещества и экспериментальные зависимости влияния концентраций астраленов на огнетушащую способность модульных установок пожаротушения тонкораспыленной водой при тушении модельных очагов пожара класса «В» внедрены и учитываются в практической деятельности ООО «СПбЭК-Майнинг» при разработке технических решений для повышения огнетушащей способности модулей пожаротушения тонкораспыленной водой, а также для разработки рецептуры огнетушащих составов для автоматических установок пожаротушения модульного типа с улучшенными характеристиками.

3. Аналитические зависимости определения параметров модульных установок пожаротушения тонкораспыленной водой от свойств огнетушащих суспензий, а также методика повышения огнетушащей способности модульных установок пожаротушения тонкораспыленной водой на объектах нефтегазового комплекса и рекомендации по её применению внедрены и учитываются в практической деятельности компании ООО «Пожнефтехим» для разработки новых рецептур огнетушащих составов для тушения пожаров нефтепродуктов.

### **Публикации**

По теме диссертационной работы опубликовано 9 научных работ, 4 из которых опубликованы в рецензируемых научных изданиях, включенных в перечень ВАК при Министерстве науки и высшего образования Российской Федерации.

**Апробация работы.** Основные результаты исследований обсуждены на: Международной научно-практической конференции «Пожарная безопасность: современные вызовы. Проблемы и пути решения». (Санкт-Петербург, 14 апреля 2020 г.); XV Международной научно-практической конференции, посвященной 30-й годовщине МЧС России «Пожарная и аварийная безопасность ФГБОУ ВО Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России. (Иваново, 17 ноября 2020 г.); Международной научно-практической конференции «Сервис безопасности в России: опыт, проблемы, перспективы. ФГБОУ ВО Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России. (Санкт-Петербург, 28 октября 2021 г.); V Международной научно-практической конференции. «Современные пожаробезопасные материалы и технологии» (Иваново, 14 октября 2021 г.).

**Личный вклад автора.** Основные научные результаты исследования, выносимые на защиту получены автором лично и опубликованы в научных статьях. Автором проведены эксперименты по определению огнетушащей способности модульной установки пожаротушения тонкораспыленной водой в условиях применения углеродных наноструктур (астраленов); получены экспериментальные зависимости влияния концентрации астраленов на физические

свойства воды и огнетушащую способность модульных установок пожаротушения тонкораспыленной водой при тушении модельного очага пожара класса «В»; выявлены аналитические зависимости огнетушащей способности модульных установок пожаротушения тонкораспыленной водой от свойств огнетушащей суспензии; разработана методика повышения огнетушащей способности модульных установок пожаротушения на объектах нефтегазового комплекса, основанная на способе пожаротушения легковоспламеняющихся и горючих жидкостей огнетушащими суспензиями воды с углеродными наноструктурами.

**Объем и структура диссертации.** Диссертация состоит из введения, 3 глав, заключения, списка литературы. Работа содержит 132 страницы текста, 29 таблиц, 49 рисунков, список литературы оставляет 109 наименований источников.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность диссертационного исследования, проанализирована степень её научной разработанности, определены объект и предмет исследования, показана научная новизна, теоретическая и практическая значимости, приведены положения, выносимые на защиту.

В первой главе **«Состояние вопроса и обоснование цели и научной задачи исследования»** рассмотрены виды и область применения модульных установок пожаротушения на объектах нефтегазовой отрасли, их основные достоинства и недостатки. Анализ факторов, влияющих на эффективность МУПТРВ при тушении пожаров нефтепродуктов, показал, что основными характеристиками системы являются: запас и интенсивность орошения ОТВ; проникающая способность капель в пламенную зону горения; количество вещества, испарившегося в пламенной зоне.

Сформулирована научная гипотеза, заключающаяся в том, что применение термически стабильных углеродных наноструктур позволяет реализовать контролируемую реакцию окисления графеновых слоев наночастиц и интенсификацию процессов теплоотвода, в результате чего снижается концентрация окислителя в зоне горения, приводящая к гашению пламени. Обоснована цель и научная задача исследования.

Во второй главе **«Обоснование выбора и анализ влияния физических свойств огнетушащих суспензий на огнетушащую способность модульных установок пожаротушения тонкораспыленной водой»** описаны объект и предмет исследования, методы проведения экспериментов и методики расчетов. В качестве базовой жидкости использовалась дистиллированная вода (DW). В качестве наноструктур, диспергированных в базовую жидкость, использовались аллотропные соединения углерода с высокой термической стабильностью – астралены (Astr) в концентрациях от 0,05 об. % до 1,0 об. %.



Для оценки изменения физических свойств были рассмотрены наножидкости на водной основе в сравнении с базовой жидкостью. Описаны методики и экспериментальные установки для проведения исследований теплофизических свойств модифицированных огнетушащих составов (таблица 1).

Таблица 1 – Программа исследований теплофизических свойств модифицированных огнетушащих составов

| №<br>п/п | Свойство жидкости                                                 | СИ                            | Цель исследования                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
|----------|-------------------------------------------------------------------|-------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1        | Плотность                                                         | $\rho$ ,<br>кг/м <sup>3</sup> | Установить влияние углеродных наноструктур на начальную скорость движения капель жидкости и минимально возможный радиус капель, что в свою очередь позволит сделать вывод об изменении проникающей способности капель тонкораспыленной суспензии в объем пламенной зоны горения относительно базовой жидкости. |
| 2        | Поверхностное натяжение                                           | $\sigma$ ,<br>Н/м             |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| 3        | Динамическая вязкость                                             | $\mu$ ,<br>Па·с               | Определить влияние углеродных наноструктур на средний объемно-поверхностный диаметр капель тонкораспыленной воды.                                                                                                                                                                                              |
| 4        | Удельная теплота парообразования                                  | $r$ ,<br>Дж/кг                | Установить влияние углеродных наноструктур на время жизни капли от начала нагрева до полного испарения и определить количество тепла, отведенного из пламенной зоны горения.                                                                                                                                   |
| 5        | Скорость испарения капель жидкости                                | $U_{\text{исп}}$ ,<br>мг/с    |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| 6        | Скорость нагрева до температуры кипения                           | $U_{\text{Ткип}}$ ,<br>°С/с   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| 7        | Водородный показатель                                             | pH                            | Исключить фактор коррозионного воздействия на МУПТРВ в условиях длительного хранения огнетушащего вещества.                                                                                                                                                                                                    |
| 8        | Температура начала термической деструкции углеродных наноструктур | °С                            | Определить, как термическая стабильность различных форм углерода влияет на способность огнетушащей суспензии ликвидировать модельный очаг пожара класса «В».                                                                                                                                                   |
| 9        | Диаметр капель                                                    | $d$ ,<br>мкм                  | Установление принадлежности капель жидкости, формируемых на выходе из оросителя лабораторной МУПТРВ к категории тонкораспыленной жидкости.                                                                                                                                                                     |

Исследование кислотности огнетушащих суспензий было проведено с помощью рН метра «WaterLiner WPH-11». Погрешность измерения не более  $\pm 0,01 \div 1$ . В ходе исследования было выявлено, что при добавлении различных концентраций астраленов в дистиллированную воду показатель кислотности (рН) существенно не изменяется.

Исследование плотности огнетушащих суспензий проводилось пикнометрическим методом, согласно ГОСТ 18995.1-73. Абсолютная погрешность измерений ( $\Delta$ ) составляет 0,0005 г/см<sup>3</sup>. У полученных суспензий, независимо от концентрации диспергированных астраленов, наблюдается повышение плотности (рисунок 1).

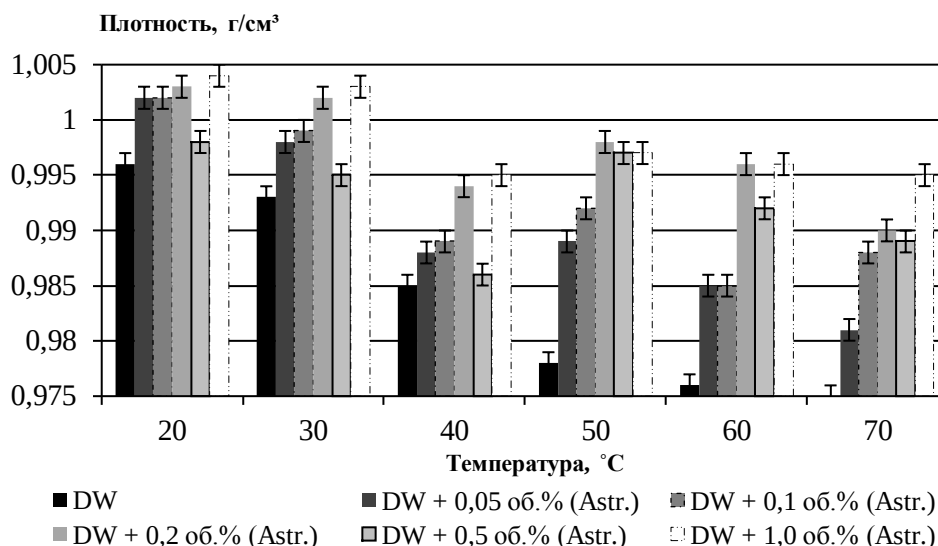


Рисунок 1 – Зависимость плотности огнетушащих суспензий с различными концентрациями Astr. от температуры:  
 DW + 0,05 об. % (а); DW + 0,2 об.% (б); DW + 0,5 об.% (в); DW + 1,0 об.% (г)

Обнаружено незначительное увеличение плотности – на 1% относительно базовой жидкости. Максимальное значение плотности при температуре  $20 \pm 1$  °C выявлено у огнетушащего состава с концентрацией наноструктур 1,0 об. % –  $1,0045 \pm 0,0005$  г/см<sup>3</sup>.

Наблюдается зависимость плотности от температуры жидкости: при нагреве состава с концентрацией астраленов 0,05 об. % с 20 до  $70 \pm 1$  °C, разница показателей плотности составила 2,4%. Снижение плотности при повышении температуры жидкости связано с ослабеванием силы взаимного притяжения молекул.

*Исследование динамической вязкости* осуществлялось методом капиллярной вискозиметрии, согласно ГОСТ 33768-2015. Относительная погрешность измерений ( $\delta$ ) составляет  $\pm 0,3\%$ .

Обнаружено, что модифицирование дистиллированной воды углеродными наноструктурами приводит к увеличению динамической вязкости огнетушащих суспензий (рисунок 2). Увеличение значений динамической вязкости наблюдается у суспензий с концентрацией астраленов 0,2 и 1,0 об.%. При этом, разница показателей при температуре  $20 \pm 1$  °C у суспензии с концентрацией астраленов 0,2 об. % составляет 7,15%, а у однопроцентной суспензии – 18,16%.

Увеличение динамической вязкости обусловлено повышением трения и сопротивления течению слоев жидкости, при диспергировании астраленов.

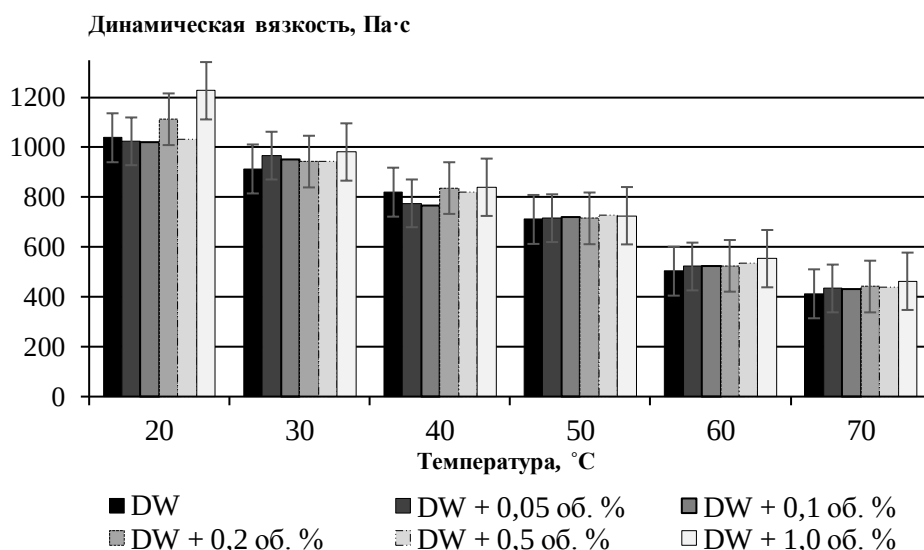


Рисунок 2 – Зависимость динамической вязкости огнетушащих суспензий с различными концентрациями Astr. от температуры:  
 DW + 0,05 об. % (а); DW + 0,2 об. % (б); DW + 0,5 об. % (в); DW + 1,0 об. % (г)

Исследование коэффициента поверхностного натяжения проводилось сталагмометрическим методом, согласно ГОСТ 8433-81.

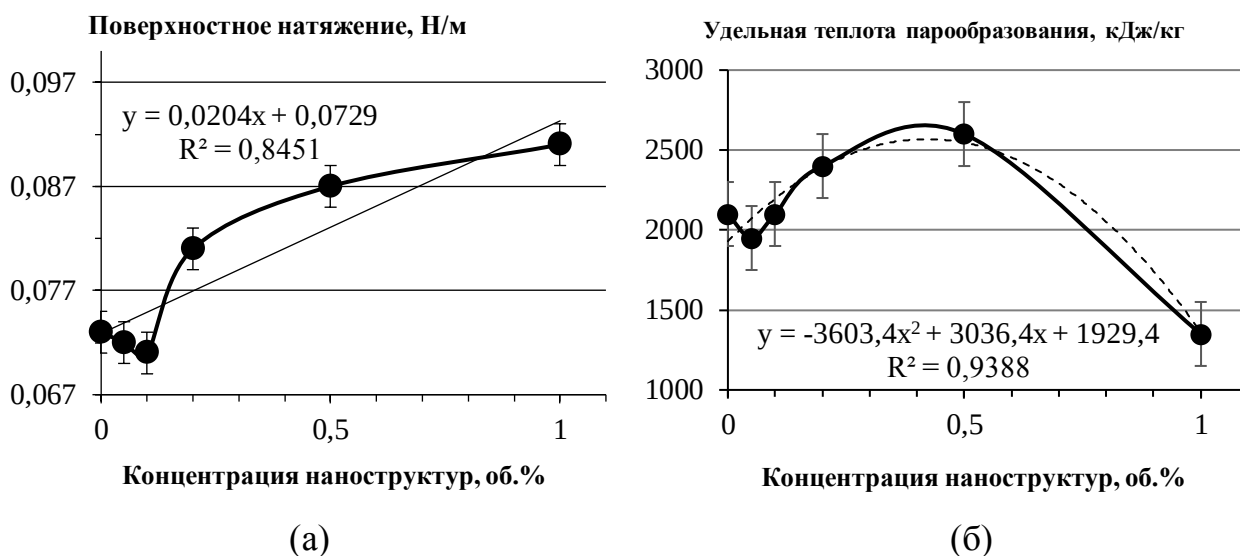


Рисунок 3 – Графики зависимости: (а) коэффициента поверхностного натяжения огнетушащих суспензий от концентрации Astr.; (б) удельной теплоты парообразования огнетушащей суспензии от концентрации Astr.

Установлено, в присутствии углеродных наноструктур коэффициент поверхностного натяжения огнетушащих суспензий увеличивается (рисунок 3 а). Наибольшее увеличение выявлено при концентрации астраленов 1,0 об. % и составляет  $0,091 \pm 0,002$  Н/м. При диспергировании астраленов с концентрацией 0,5 об. % поверхностное натяжение составляет  $0,087 \pm 0,002$  Н/м.

Таким образом, среднее расстояние между молекулами жидкости снижается, следовательно, коэффициент поверхностного натяжения увеличивается. Стоит отметить, что астралены не растворимы в воде, но в то же время вода накладывает условия на то, как должны размещаться астралены в суспензии.

*Исследование удельной теплоты парообразования* осуществлялось методом автоклавирования. Абсолютная погрешность измерений ( $\Delta$ ) составляет 200 кДж/кг.

Установлено значение удельной теплоты парообразования базовой жидкости, равное  $2100 \pm 200$  кДж/кг. С повышением концентрации наноструктур до 0,2 и 0,5 об. % данный показатель увеличивается на 14,2 и 23,8 % до  $2400 \pm 200$  и  $2600 \pm 200$  кДж/кг соответственно (рисунок 3 б). У огнетушащих суспензий с содержанием наноструктур в количестве, равном 0,05 и 1,0 об. %, установлено снижение удельной теплоты парообразования относительно базовой жидкости на 7,15 и 35,7 % до  $1950 \pm 200$  и  $1350 \pm 200$  кДж/кг соответственно.

Изменение удельной теплоты парообразования суспензии обусловлено образованием водородных связей между астраленами и молекулами воды.

*Определение скорости нагрева огнетушащей суспензии до температуры кипения* осуществлялось на лабораторной установке, представляющей собой ТЭН мощностью 2,2 кВт, который разогревал емкость объемом 20 мл.

Результаты показали, при увеличении концентрации наноструктур скорость нагрева до температуры кипения увеличивается. Данный эффект наблюдается при повышении концентрации до 0,5 об. % включительно. Дальнейшее увеличение концентрации не приводит к повышению скорости нагрева до температуры кипения. Увеличение скорости нагрева суспензии до температуры кипения обусловлено содержанием углеродных наноструктур, которые позволяют увеличить теплопроводность и теплоемкость суспензий.

*Определение размера капель* огнетушащих суспензий осуществлялось путем анализа цифровых фотографий потоков ОТВ с использованием средств высокоскоростной (не менее  $10^3$  fps) цифровой фоторегистрации и программного продукта «Image Analysis 3.5» (разработчик: «NT-MDT», г. Москва).

Анализ данных, полученных в ходе эксперимента, показал, что при помощи лабораторной установки возможно получение капель с размерами от 20 до 150 мкм.

*Определение скорости испарения капель* огнетушащих суспензий осуществлялось посредством формирования капель одинакового радиуса (в пределах от 1,15 до 1,26 мм.) и вычисления их массы. Принимая геометрическую форму капли за сферу, рассчитан объем, который варьировался от 6,37 до 8,37 мм<sup>3</sup>. Учитывая показатели плотностей наножидкостей, определена скорость испарения капель (рисунок 4 а). Относительная погрешность ( $\delta$ ) составляет 3,3%.

Обнаружено, что скорость испарения капель наножидкостей с концентрациями астраленов от 0 до 0,5 об. %, снижается с 0,89 до 0,49 мг/с. При достижении концентрации наноструктур 1,0 об. %, скорость испарения капель резко возрастает до 1,19 мг/с. Данное значение превышает скорость испарения базовой жидкости на  $25,22 \pm 3,3\%$ .

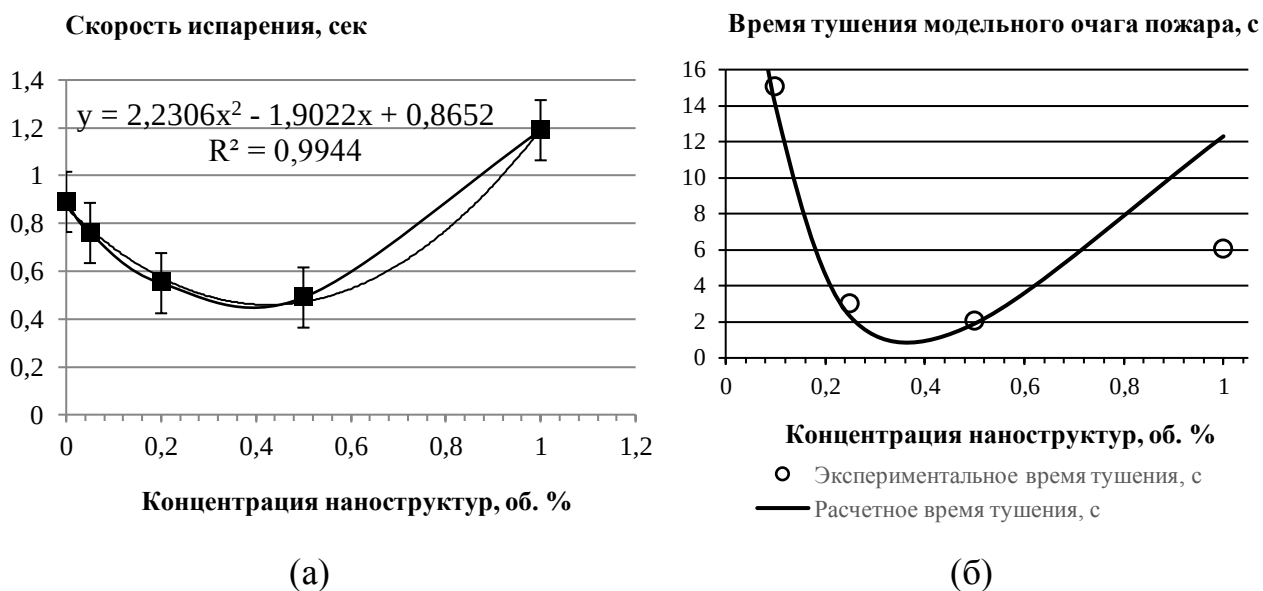


Рисунок 4 – Графики зависимостей: (а) скорости испарения капель модифицированной огнетушащей жидкости от концентрации Astr.; (б) расчетного и экспериментального времени тушения модельного очага пожара класса «В» от концентрации Astr.

Снижение скорости испарения при повышении концентрации астраленов в объеме жидкости связано с увеличением энергии когезии. При увеличении концентрации астраленов до 1,0 об. % возрастание скорости испарения, вероятно, связано с изменением структуры вещества и перераспределением электронов молекул таким образом, при котором астралены наиболее ярко проявляют свои гидрофобные свойства.

Определение времени тушения модельного очага пожара проводилось с применением лабораторной установки, представляющей из себя полую металлическую трубу п-образной формы, на вершине которой закреплен ороситель, формирующий тонкораспыленную струю. Огнетушащее вещество подавалось из закачного баллона объемом 5,0 л, находящегося под давлением 1,21 МПа. Модельный очаг пожара представлял из себя цилиндрическую емкость с габаритными размерами согласно ГОСТ Р 53288-2009 в которую помещён бензин марки АИ-95 (ГОСТ 32513-2013), нагретый до температуры кипения.

Анализ данных показал, что наиболее эффективным огнетушащим веществом является суспензия с концентрацией астраленов 0,5 об. %. Среднее время тушения при данной концентрации составляет 2,0 с. Дальнейшее

увеличение концентрации приводит к повышению времени тушения (рисунок 4 б). Так, при диспергировании астраленов в состав ОТВ 1,0 об. %, ликвидация очага возгорания происходит за 6,0 секунд. Максимальное сокращение времени тушения пожара составляет 86 %.

Огнетушащие суспензии с концентрацией УНТ ниже 0,25 об. %, в том числе дистиллированная вода, оказались неэффективными. Подача ОТВ в модельный очаг осуществлялось в течении 15 секунд, в результате чего очаг не был потушен.

Для сопоставления расчетных и экспериментальных данных времени тушения модельного очага пожара использовались формула (1). Исходные данные теплофизических характеристик горючей жидкости и огнетушащих составов принимались в соответствии с исследованием. В ходе расчетов установлено, что теоретическое время тушения в целом соответствует с экспериментальными данными (рисунок 4 б).

$$\tau_{\text{туш}} = -\frac{4}{3} \cdot \frac{\lambda \cdot \rho}{c \cdot m^2} \cdot \left[ \frac{I_{\text{кр}}}{I} + \ln \left( 1 - \frac{I_{\text{кр}}}{I} \right) \right] \quad (1)$$

где  $m$  – массовая скорость выгорания жидкости, кг/(м<sup>2</sup>·с);  $c, \rho, \lambda$  – теплоемкость, плотность, теплопроводность горючей жидкости;  $I$  – интенсивность орошения водой поверхности горючей жидкости, л/м<sup>2</sup>·с;  $I_{\text{кр}}$  – критическая интенсивность тушения горючей жидкости, л/м<sup>2</sup>·с.

При анализе результатов было выявлено наличие экстремумов. В большинстве случаев экстремум достигался при концентрации астраленов 0,5 об.%. Также, данная огнетушащая суспензия продемонстрировала минимальное время тушения модельных очагов пожара класса «В». Таким образом, выявлена оптимальная концентрация астраленов – 0,5 об.%.

*Исследование термической стабильности углеродных наноструктур* проводилось на приборе синхронного термического анализа NETZSCH STA 449 F3 Jupiter. Оценивалось изменение массы и тепловых эффектов наноструктур в диапазоне температур от 0 до 1100 °С. Скорость нагрева 10 К/мин.

Анализ данных показал, что температура, при которой начинается термическое разложение астраленов составляет 677,7 °С, а фуллереносодержащей сажи 484,3 °С. При этом максимальная скорость потери массы фуллереносодержащей сажи обнаружена при температуре 638,2 °С составляет 3,74 %/мин, а у астраленов 3,11 %/мин при температуре 903,0 °С. Остаточная масса отличается незначительно и составляет 16,5 % и 11,5 % для фуллереносодержащей сажи и астраленов соответственно.

Руководствуясь экспериментальными данными, выбор астраленов в качестве наномодифицированной добавки к воде обусловлен их высокой термической стабильностью.

В третьей главе «Математическое моделирование результатов испытаний и методика повышения огнетушащей способности модульных установок пожаротушения тонкораспыленной водой на объектах нефтегазового комплекса» приводятся результаты регрессионной задачи с целью моделирования времени тушения пожара модифицированными огнетушащими составами с помощью программного продукта STATISTICA Application 10.

С целью проведения оценки влияния входных факторов (ВФ) –  $X_1 \div X_5$ , (поверхностное натяжение, плотность, динамическая вязкость, удельная теплота парообразования, температура кипения наножидкости) на выходной параметр (ВП) – время тушения пожара (Y) огнетушащими составами, модифицированными углеродными наноструктурами проводились испытания с воспроизведением 100 (N=50) различными сочетаниями ВФ.

Адекватность данной модели оценивалась по критерию Фишера:  $F(3,11)=34,70$ . Критическое значение статистики в нашем случае равно 4,76. Таким образом регрессия является значимой при заданном уровне значимости 0,05. Коэффициент множественной детерминации равен  $R^2= 0,949$ , следовательно, полученная регрессионная модель объясняет 94,9% дисперсии зависимой переменной – ВП. Дисперсия ошибки оценки составляет 5,1%.

Регрессионная модель, построенная, построенная по результатам исследования тушения пожара в условиях применения огнетушащих суспензий представлена в формуле (2):

$$Y = 419,15 - 18,41 \cdot X_5 - 0,031 \cdot X_4 - 0,16 \cdot X_3 \quad (2)$$

Минимальная и максимальная стандартные ошибки прогноза составляют 5,19 и 7,47 соответственно. Интерпретация полученных данных показывает, что увеличение скорости нагревания жидкости до температуры кипения на 1 °C/с, приводит к снижению времени тушения пожара на 18,41 с. При увеличении удельной теплоты парообразования на 1 Дж/кг, время тушения пожара снижается на 0,031 с. Средняя стандартная ошибка прогноза 6,14 с.

Данные результатов исследования об определении влияния теплофизических свойств огнетушащей жидкости на время тушения модельного очага пожара класса «В» свидетельствуют о возможности применения астраленов в качестве модификатора огнетушащего вещества, применяемого в МУПТВ.

Моделирование распространения опасных факторов пожара при тушении модифицированными огнетушащими составами осуществлялось с помощью программного обеспечения «PyroSim». Для этого была построена полевая модель, типового склада хранения нефтепродуктов для моделирования в Fire Dynamics Simulator (FDS). Размер ячеек (м): 0,78 x 0,83 x 0,83. Общее количество ячеек 3456. Вид легковоспламеняющейся жидкости: бензин ( $\rho \approx 0,71 \div 0,76$  г/см<sup>3</sup>). Площадь

пролива:  $2,25 \text{ м}^2$ . Средне поверхностная плотность теплового излучения факела пламени:  $130 \text{ кВт/м}^2$ .

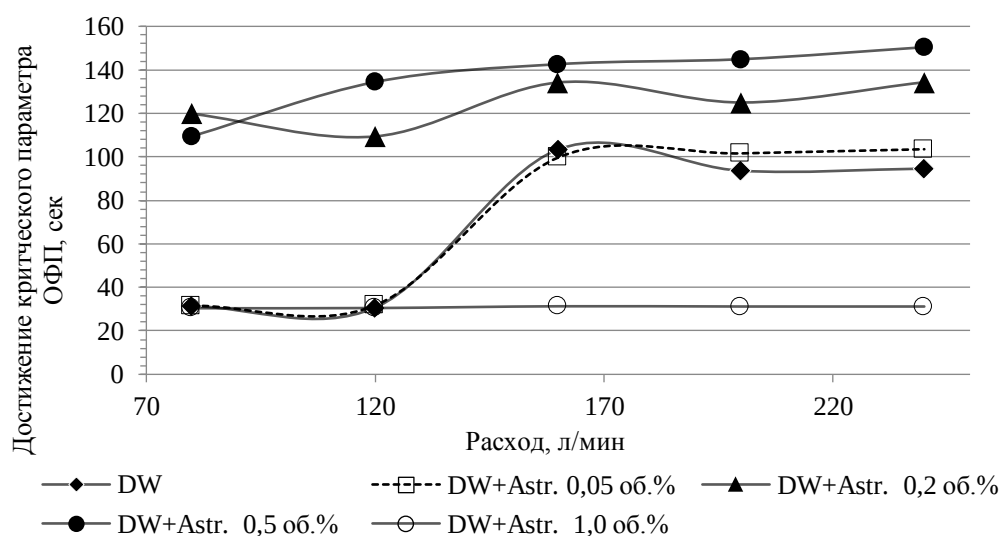


Рисунок 5 – График достижения предельно допустимого значения по повышенной температуре в зависимости от расхода и типа огнетушащего вещества

Установлено, при расходе 120 л/мин время достижения предельно допустимого значения температуры окружающей среды увеличилось на 77% относительно чистой воды (с 30,5 до 134,4 с). Моделирование тушения пожара огнетушащим составом с концентрацией УНТ 0,5 об. % показало, время достижения данного параметра ОФП составляет 109,5 с. при расходе ОТВ 80 л/мин, что выше показателей при тушении DW на 71,4 % (31,3 с.), а при повышении расхода до 240 л/мин 150,4 с. (рис. 5).

Таким образом, результаты регрессионного анализа и динамики распространения ОФП определяют решающие факторы процессов тушения пожаров нефтепродуктов модифицированными огнетушащими составами: концентрация астраленов, свойства наножидкостей (скорость нагрева до температуры кипения, динамическая вязкость, удельная теплота парообразования,) и расход огнетушащего вещества.

Таблица 2 – Характеристики МУПТРВ

| № п/п | Характеристика МУПТРВ                 | СИ                                 | Цель исследования                                                                                                                                           |
|-------|---------------------------------------|------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1     | Начальная скорость движения капель    | $u_0$ , м/с                        | Установление начальной скорости потоков жидкости достаточной для ликвидации модельного очага пожара класса «В» в условиях испытаний.                        |
| 2     | Критическая интенсивность тушения     | $I_{кр}^T$ , л/(м <sup>2</sup> ·с) | Являются критериями оценки огнетушащей способности модульной установки пожаротушения тонкораспылённой водой при тушении модельного очага пожара класса «В». |
| 3     | Время тушения модельного очага пожара | $\tau_{туш}$ , сек                 |                                                                                                                                                             |



При выявлении зависимостей огнетушащей способности МУПТВ от концентрации астраленов определялись следующие параметры: начальная скорость движения капель, ОТВ критическая интенсивность тушения и время тушения пожара (таблица 2).

При оценке критической интенсивности тушения пламени нефтепродукта, модифицированным огнетушащим веществом исследовали зависимости критической интенсивности тушения пожара ( $I_{кр}$ ) от удельной теплоты парообразования огнетушащего вещества. Результаты, полученные в ходе исследования данной свойства суспензии, позволяют оценить влияние углеродных наноструктур на критическую интенсивность тушения пожара (рисунок 6).

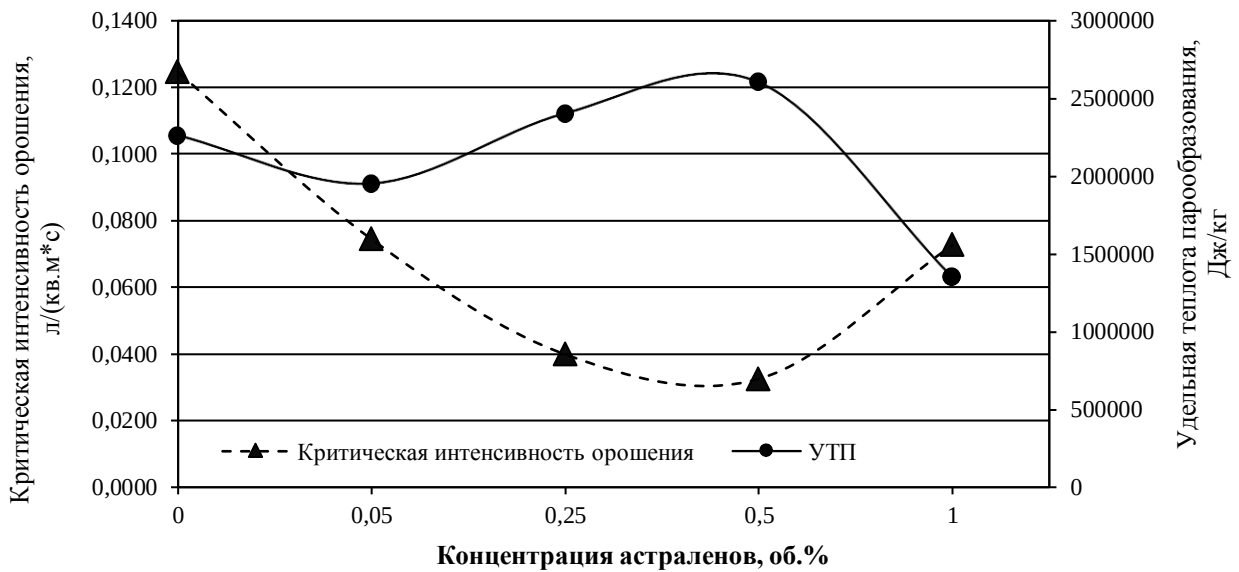
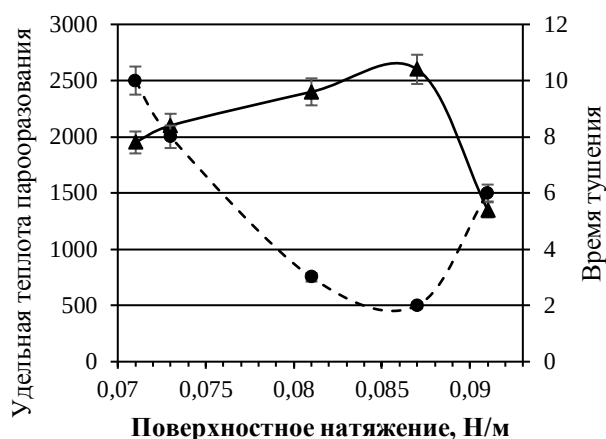


Рисунок 6 – Совмещенный график зависимости критической интенсивности тушения огнетушащими суспензиями ( $I_{кр}$ ) и удельной теплоты парообразования от концентрации Astr.

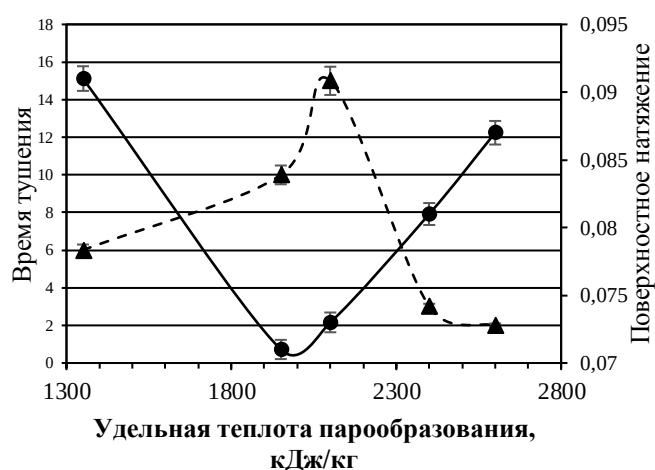
Установлено, что увеличение концентрации астраленов до 0,5 об.% включительно позволяет снизить критическую интенсивность на 73 % с 0,12 до 0,032 л/(м<sup>2</sup>·с). Дальнейшее повышение концентрации приводит к увеличению критической интенсивности тушения. По дополнительной оси построен график зависимости удельной теплоты парообразования от концентрации астраленов. Обнаружена обратная зависимость удельной теплоты парообразования от критической интенсивности тушения.

С помощью известного выражения (3) определяли теоретическое время тушения горючей жидкости МУПТВ. Обнаружена обратная зависимость времени тушения модельного очага класса «В» от удельной теплоты парообразования огнетушащей суспензии при увеличении поверхностного натяжения (рисунок 7 а).



—●— Удельная теплота парообразования, кДж/кг  
 -▲- Время тушения, с

(a)

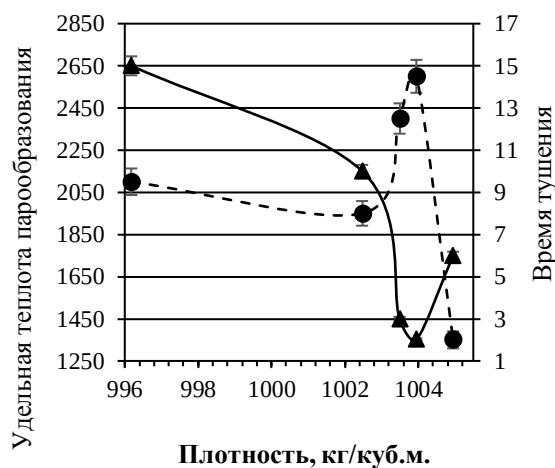


-▲- Время тушения, с  
 —●— Поверхностное натяжение, Н/м

(б)

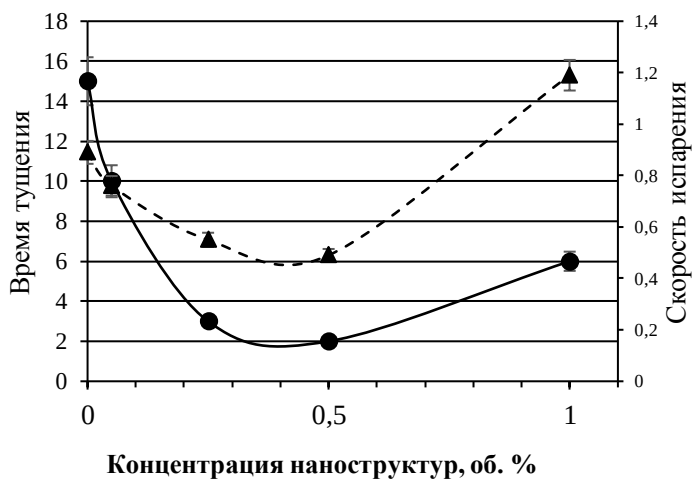
Рисунок 7 – Совмещенный график зависимости: (а) времени тушения и удельной теплоты парообразования от поверхностного натяжения огнетушащих суспензий; (б) времени тушения и поверхностного натяжения от удельной теплоты парообразования огнетушащих суспензий

Тушение пожара на ранней стадии в основном зависит от эффективности охлаждения пламенной зоны. На этой стадии мощность теплового потока не достигает максимального значения, поскольку в горении участвует небольшая часть топлива и коэффициент полноты сгорания минимальный.



-●- Удельная теплота парообразования, кДж/кг  
 —▲— Время тушения, с

(a)



—●— Время тушения, с  
 -▲- Скорость испарения, мг/с

(б)

Рисунок 8 – Совмещенный график зависимости: (а) времени тушения от удельной теплоты парообразования от плотности огнетушащих суспензий; (б) времени тушения от скорости испарения капель жидкости от концентрации наноструктур

Увеличение удельной теплоты парообразования оказывает эффект на время ликвидации при достижении равномерного распределения капель жидкости в объеме пламенной зоны горения для эффективного теплоотвода (рисунок 8, а).

Повышение концентрации астраленов приводит к снижению скорости испарения капель жидкости при концентрациях от 0,05 до 0,5 об. % включительно (рисунок 8, б). Увеличение времени существования капли от начала нагрева до полного испарения связано с повышением удельной теплоты парообразования.

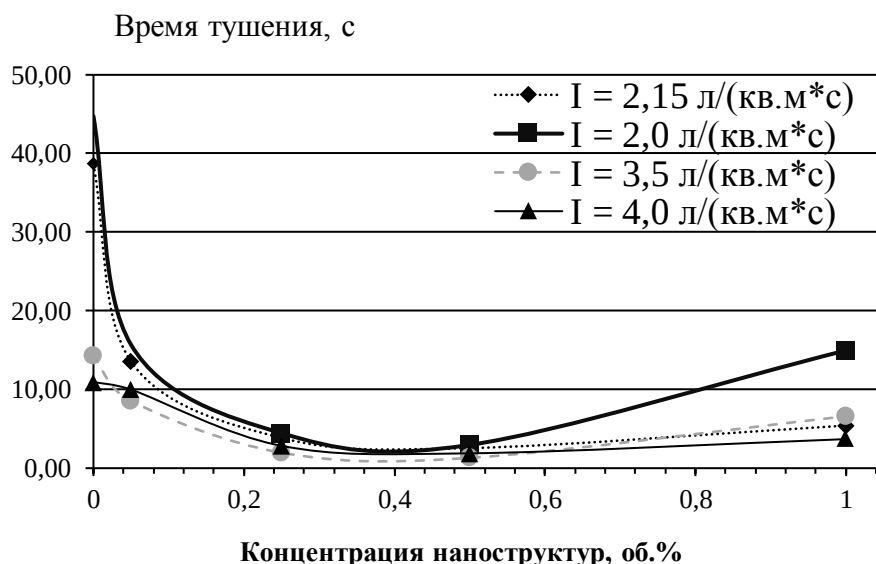


Рисунок 9 – Совмещенный график зависимости времени тушения модельных очагов пожара класса "В" от интенсивности орошения огнетушащими суспензиями

Установлено устойчивое тушение при использовании огнетушащих суспензий с концентрациями астраленов от 0,25 до 1,0 об. % (включительно) и изменении интенсивности подачи (рисунок 9). При этом повторное воспламенение не наблюдалось в течении 10 минут.

Таблица 3 – Оптимальные параметры свойств огнетушащей суспензии

| Свойство                                                          | СИ               | Показатель     |
|-------------------------------------------------------------------|------------------|----------------|
| Удельная теплота парообразования суспензии                        | кДж/кг           | 2400...2600    |
| Коэффициент поверхностного натяжения суспензии                    | Н/м              | не менее 0,081 |
| Скорость нагрева до температуры кипения суспензии                 | °С/с             | не менее 9,0   |
| Размер основной массы капель распыленной суспензии                | мкм              | не более 150   |
| Удельный требуемый расход огнетушащей суспензии                   | л/м <sup>2</sup> | 0,43           |
| Температура начала термической деструкции углеродных наноструктур | °С               | от 900         |

В результате проведенных экспериментов были выявлены оптимальные параметры свойств огнетушащих суспензий, при которых возможна ликвидация возгорания модельного очага класса «В», представленные в таблице 3.

При этом необходимыми условиями являются: достижение скорости движения потока капель тонкораспыленной суспензии большей или равной

скорости восходящих конвективных потоков ( $u_w \geq u_{f\max}$ ), достижение показателя критической интенсивности тушения МУПТВ большей или равной теоретическому значению критической интенсивности тушения.

Для повышения огнетушащей способности МУПТРВ на объектах нефтегазового комплекса предложены следующие этапы, реализуемые методиками:

1. Предварительный этап (подготовка суспензии):

- подготовить огнетушащую суспензию на водной основе, с объемным содержанием углеродных наноструктур 0,5 об.%.

- определить показатели свойств суспензии: коэффициент поверхностного натяжения сталагмометрическим методом; удельную теплоту парообразования – калориметрическим методом; скорость нагрева до температуры кипения – нагревом до температуры кипения. При достижении параметров, указанных в таблице 3 перейти к следующему пункту.

- с помощью существующих зависимостей определить критическую интенсивность тушения для защищаемого объекта ( $I_{кр}$ ) и сравнить её с характеристиками существующей МУПТРВ.

- определить огнетушащую способность МУПТРВ в условиях использования огнетушащей суспензии согласно установленному (ГОСТ Р 53288-2009).

2. Основной этап (модернизация МУПТРВ):

- осуществить модернизацию МУПТВ посредством оснащения емкостью с концентратом наноструктур.

Сущность использования огнетушащей суспензии заключается в подаче концентрированной суспензии астраленов в емкость с базовым огнетушащим составом, вытесняемым источником повышенного давления. При движении полученной суспензии по трубопроводам подачи и распылении на выходе из оросителя происходит измельчение капель жидкости и агломераций астраленов в десятки раз, что обеспечивает необходимый отвод тепла из зоны горения и снижение температуры на критическую величину  $\Delta T$  до температуры потухания.

Методика повышения огнетушащей способности модульных установок пожаротушения путем диспергирования в состав огнетушащего вещества углеродных наноструктур применима в качестве элемента системы обеспечения пожарной безопасности, как составляющая системы предотвращения пожара на объектах нефтегазовых предприятий: в помещениях АСУ ТП, АСДУЭ, расходных складах, продуктовых насосных станциях, автозаводских электролабораториях, складах тарного хранения.

Сформулированы рекомендации по применению углеродных наноструктур в МУПТРВ, включающие себя технологии рецептуры, внедрения и использования.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Цель диссертационного исследования достигнута. Решена научная задача, заключающаяся в научно-методическом обосновании применения термически стабильных аллотропных форм углерода для повышения огнетушащей способности модульных установок пожаротушения тонкораспыленной водой за счет интенсификации теплоотвода из пламенной зоны горения нефтепродуктов.

1. Определены изменения физических свойств воды, модифицированной астраленами относительно базовой жидкости, что позволило сократить время тушения модельного очага пожара класса «В» на 86 % при подаче тонкораспыленной огнетушащей суспензии с оптимальной концентрацией астраленов 0,5 об.%. В условиях математического моделирования подтверждена эффективность огнетушащей суспензии. При тушении пожара огнетушащей суспензией с расходом 120 л/мин время достижения предельно допустимого значения температуры окружающей среды увеличилось на 77% от чистой воды.

2. Получена аналитическая зависимость влияния свойств огнетушащей суспензии на время тушения модельного очага пожара класса «В». Определены статистические значимые факторы: скорость нагрева до температуры кипения, удельная теплота парообразования и динамическая вязкость. Выполнено моделирование распространения опасных факторов пожара при тушении пожара ЛВЖ астраленосодержащими огнетушащими составами. Получена аналитическая зависимость влияния свойств огнетушащей суспензии на время тушения модельного очага пожара класса «В». Выполнены расчеты, определяющие теоретическое время тушения, критическую интенсивность тушения и количество отведенного тепла из зоны горения при тушении модельного очага пожара класса «В» огнетушащими суспензиями. Установлено, что расчетные данные в целом согласуются с результатами экспериментов. Выявлено максимальное сокращение критической интенсивности тушения на 73 % (с 0,124 до 0,032 л/(м<sup>2</sup> · с)).

3. Дано обоснование механизма действия огнетушащей жидкости, модифицированной астраленами в МУПТРВ, позволяющей повысить её огнетушащую способность при тушении легковоспламеняющихся и горючих жидкостей. При этом сохраняются наилучшие характеристики ТРВ: дисперсность капель (20-150 мкм), высокая проникающая способность, достигнутая за счет увеличения поверхностного натяжения с 0,073 до 0,087 Н/м, низкая критическая интенсивность тушения модельного очага класса «В» - 0,032 л/(м<sup>2</sup>·сек). Расчётным способом установлено, применение термически стабильных форм углерода в составе воды, позволяет увеличить теплоотвод из пламенной зоны горения в сравнении с немодифицированным огнетушащим веществом. Разработана методика повышения огнетушащей способности МУПТРВ на объектах с обращением нефтепродуктов, а также рекомендации по её применению.

**Список работ, опубликованных автором по теме диссертации**  
*Статьи в ведущих рецензируемых научных журналах и изданиях,  
 рекомендованных ВАК при Министерстве науки и высшего образования  
 Российской Федерации:*

1. Пустовалов, И. А. Моделирование применения модифицированных огнетушащих составов в модульных установках пожаротушения на объектах с обращением твердых и жидких топлив [Электронный ресурс] / И. А. Пустовалов, А. В. Иванов, А. Н. Пономарев // Техносферная безопасность. – 2021. – № 1 (30) – С. 32-41. 0,7/0,5 Мб.

2. Пустовалов, И. А. Экспериментальное исследование огнетушащей способности модульных установок пожаротушения тонкораспыленной водой, модифицированной астралинами / И. А. Пустовалов // Научно-технический журнал «Пожаровзрывобезопасность». – 2021. – Т.30, № 5. — С. 84-96. 0,75 п.л.

3. Пустовалов, И. А. Методика повышения огнетушащей способности модульных установок пожаротушения тонкораспыленной водой на объектах нефтегазового комплекса [Электронный ресурс] / И. А. Пустовалов, А. В. Иванов // Научно-технический журнал «XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс». – 2021. – № 4 (56) – С. 187-192. 0,8/0,5 Мб.

4. Пустовалов, И. А. Добавки для повышения эффективности тонкораспыленной воды при тушении пожаров нефтепродуктов [Электронный ресурс] / И. А. Пустовалов, А. В. Иванов // Техносферная безопасность. – 2024. № 1 (42) – С. 2-11. 0,6/0,3 Мб.

*Публикации в международных, Всероссийских и других научных изданиях:*

5. Пустовалов, И. А. Исследование влияния наноструктур на огнетушащую эффективность распыленных водосодержащих составов при тушении пожаров в замкнутом объеме [Электронный ресурс] / И. А. Пустовалов, А. В. Иванов, В. А. Кучерявенко // Пожарная безопасность: современные вызовы. проблемы и пути решения: материалы Международной научно-практической конференции, 14 апреля 2020 г. – Санкт-Петербург, 2020. – С. 85-87. 0,3/0,2 Мб.

6. Пустовалов, И. А. Интеллектуальные системы обеспечения пожарной безопасности мультимодальных перевозок нефтепродуктов [Электронный ресурс] / И. А. Пустовалов, А. В. Иванов, А. Н. Пономарев // Пожарная и аварийная безопасность: материалы XV Международной научно-практической конференции, посвященной 30-й годовщине МЧС России, 17 ноября 2020 г. – Иваново, 2020. – С. 39-41. 0,3/0,2 Мб.

7. Пустовалов, И. А. Повышение огнетушащей эффективности составов для авиационных средств тушения пожаров нефтепродуктов в арктическом регионе [Электронный ресурс] / И. А. Пустовалов, А. В. Иванов, А. А. Ооржак // Сервис безопасности в России: опыт, проблемы, перспективы. Арктика - регион

стратегических интересов: правовая политика и современные технологии обеспечения безопасности в арктическом регионе: материалы Международной научно-практической конференции, 28 октября 2020 г. – Санкт-Петербург, 2020. – С. 174-176. 0,5/0,2 Мб.

8. Пустовалов, И. А. Особенности применения наноструктурированных материалов в системах пожаротушения на объектах защиты [Электронный ресурс] / И. А. Пустовалов // Современные пожаробезопасные материалы и технологии: материалы V Международной научно-практической конференции, 14 октября 2021 г. – Иваново, 2021. – С. 117-120. 0,4 Мб.

9. Пустовалов, И. А. Модернизация модульных установок пожаротушения для тушения пожаров на объектах с обращением нефтепродуктов [Электронный ресурс] / И. А. Пустовалов, А. В. Иванов // Пожарная безопасность: современные вызовы. Проблемы и пути решения: материалы Всероссийской научно-практической конференции, 26 апреля 2022 г. – Санкт-Петербург, 2022. – С. 145-147. 0,3/0,2 Мб.

---

|                    |              |                   |
|--------------------|--------------|-------------------|
| Подписано в печать | 06.09.2024   | Формат 60x84 1/16 |
| Печать цифровая    | Объем 1 п.л. | Тираж 100 экз.    |

---

Отпечатано в Санкт-Петербургском университете ГПС МЧС России  
196105, Санкт-Петербург, Московский проспект, д. 149