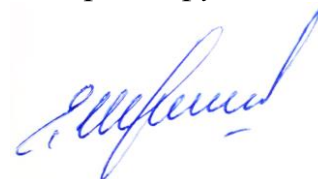


*На правах рукописи*



**Ширяев Евгений Викторович**

**СНИЖЕНИЕ ПОЖАРНОЙ ОПАСНОСТИ ЛОКАЛЬНЫХ ПРОЛИВОВ  
УГЛЕВОДОРОДНЫХ ЖИДКОСТЕЙ НА ОСНОВЕ ПРИМЕНЕНИЯ  
ГРАНУЛИРОВАННОГО ПЕНОСТЕКЛА**

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

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

Москва – 2021

Работа выполнена на кафедре пожарной безопасности технологических процессов  
(в составе учебно-научного комплекса пожарной безопасности объектов защиты)  
Академии ГПС МЧС России

Научный руководитель: Заслуженный работник высшей школы  
Российской Федерации,  
доктор технических наук, профессор  
**Назаров Владимир Петрович**

Официальные оппоненты: **Гражданкин Александр Иванович**,  
доктор технических наук,  
Закрытое акционерное общество  
«Научно–технический центр исследований  
проблем промышленной безопасности», отдел  
системного анализа безопасности,  
заведующий

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

Ведущая организация: **ФГБУ ВНИИПО МЧС России**

Защита состоится «22» февраля 2022 года в 10 часов 00 минут на заседании  
диссертационного совета Д 205.002.02 в Академии ГПС МЧС России по адресу:  
129366, г. Москва, ул. Бориса Галушкина, 4.

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

<https://academygps.ru/upload/iblock/916/916170a1569a2753dfdb91d316ba3eb5.pdf>

Автореферат разослан «22» декабря 2021 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
д.т.н., профессор



Сивенков Андрей Борисович

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** Пожарная опасность объектов нефтегазового комплекса характеризуется размещением значительного количества пожаровзрывоопасных веществ на относительно небольшой территории, что создает возможность возникновения и развития крупных пожаров, влекущих за собой гибель людей, причиняющих огромный материальный и экологический ущерб.

Анализ статистических данных по пожарам на объектах нефтегазовой отрасли показывает, что пожары пролива занимают первое место по количеству среди сценариев развития пожара, при этом характеризуются быстрым распространением огня на прилегающие участки технологического оборудования и возможностью перехода в стадию эскалации.

Ограничение распространения пожара за пределы очага регламентируется ст. 59 Федерального закона «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности». Одним из наиболее простых и, достаточно, эффективных способов снижения пожарной опасности локальных проливов горючих жидкостей является применение поддонов с гранулированным наполнителем. За счет экранирования поверхности испарения углеводородной жидкости слоем гранул уменьшается площадь испарения, с увеличением толщины гранулированного слоя возрастает сопротивление движению молекул пара, что приводит к снижению объема горючей смеси, поступающей в зону реакции горения. Механизм гашения пламени гранулированным слоем заключается в изоляции зоны горючих паров от тепла, излучаемого зоной реакции горения, а также обеднении горючей паровоздушной смеси кислородом.

В настоящее время в качестве изолирующего слоя в поддонах для сбора локальных проливов углеводородных жидкостей применяются тяжелые гравийные наполнители в виде щебня, талька, гравия насыпной плотностью более  $1000 \text{ кг/м}^3$ , а также легкие гранулированные материалы, в виде керамзита, пеностекла, вермикулита и т.п. Основным недостатком применения тяжелых гранул является отрицательная плавучесть, что значительно снижает изолирующий эффект при повышении уровня горючей жидкости до полного его отсутствия. По сравнению с тяжелым гравием экранирующий слой, состоящий из легких гранул, например, из пеностекла плотностью  $150\text{-}250 \text{ кг/м}^3$  способен держаться на поверхности жидкости при повышении ее уровня под действием архимедовой силы, достигая равновесного состояния и обеспечивая изолирующий эффект.

Анализ исследований и технических разработок в области снижения пожарной опасности локальных проливов горючих жидкостей на основе применения гранулированных материалов показал, что существуют пробелы в определении параметров испарения и горения жидкостей при экранировании поверхности пролива пористой средой, а также не определены условия, при которых обеспечивается гашение пламени слоем гранул пеностекла (СП), находящемся в равновесном состоянии.

Одним из основных факторов, обуславливающих актуальность настоящей работы, является то, что до настоящего времени отсутствовали исследования, направленные на выбор оптимального гранулометрического состава (фракции) пеностекла, который при минимальной толщине СГП способствует максимальному снижению параметров испарения и при этом исключается возможность поддержания горения.

Таким образом, перспективным направлением в совершенствовании простого, экономичного и достаточно эффективного способа изоляции поверхности пролива углеводородных жидкостей является применение легкого пористого, низкогигроскопичного СГП.

**Степень разработанности темы исследования.** Вопросами пожарной опасности диффузионного горения жидкостей, а также экспериментальными исследованиями способов самотушения горящих жидкостей занимались отечественные и зарубежные ученые: Блинов В.И., Худяков Г.Н., Коротких В.Ф., Потякин В.И., Хафизов Ф.Ш., *Mackintosh T.W., Berlad A. L., Potter A. E.*, и др.

В области снижения пожарной опасности локальных аварийных проливов углеводородных жидкостей на основе применения гранулированных материалов проводились исследования: Бондаренко П.Г., Повзиком Я.С., Мокроусовым Е.Я., Агафоновым В.В., Дадашовым И.Ф., *Takeuchi T., Hayasaka H., Zanganeh D., Moghtaderi J., Kong B.W.* и др.

Анализ результатов работ в области исследования эффективности изоляции поверхности пролива углеводородных жидкостей гранулированными материалами, показал, что ряд вопросов остаются малоизученными, в частности: не обоснован вид и оптимальный размер фракции гранулированного материала, при котором обеспечивается эффективное снижение скорости испарения и удельной массовой скорости выгорания жидкостей; не определена равновесная высота «сухого» слоя гранул при всплытии СГП; не определена критическая высота гранулированного слоя, при которой достигается эффект гашения пламени.

**Целью работы** является снижение пожарной опасности локальных проливов углеводородных жидкостей на основе применения гранулированного пеностекла в качестве экрана испарения жидкостей.

Для достижения поставленной цели решались **следующие задачи:**

– провести анализ пожарной опасности локальных проливов углеводородных жидкостей;

– разработать и экспериментально обосновать модель расчета критической высоты «сухого» СГП на поверхности пролива углеводородных жидкостей, обеспечивающей гашение пламени;

– исследовать влияние физико-химических свойств углеводородных сред, физических свойств и высоты СГП, а также площади покрытия пролива на характеристики испарения, горения и гашения пламени углеводородных жидкостей;

– разработать методику определения геометрических параметров СГП, обеспечивающего гашение пламени углеводородных жидкостей в поддонах для

сбора локальных проливов, и дать рекомендации по применению данных поддонов.

**Объектом исследования** является слой гранулированного пеностекла, расположенный на поверхности локального пролива углеводородных жидкостей, а **предметом исследования** – параметры слоя гранулированного пеностекла (гранулометрический состав, высота слоя, пористость слоя, насыпная плотность гранул), обеспечивающие снижение параметров испарения и способствующие пассивному гашению пламени локальных проливов углеводородных жидкостей.

**Научная новизна** работы заключается в следующем:

- получены зависимости высоты «сухого» СГП в условиях равновесного состояния от свойств жидкости, физических свойств СГП;

- разработаны и экспериментально обоснованы: математическая модель скорости испарения углеводородных жидкостей с экранирующим СГП; математическая модель гашения пламени при экранировании поверхности пролива СГП, позволяющая определять критическую высоту «сухого» СГП в зависимости от физико-химических свойств углеводородных сред, физических свойств СГП, а также площади покрытия пролива;

- получены ранее неизвестные зависимости, а именно: критической удельной массовой скорости выгорания от свойств углеводородных жидкостей, параметров пористой среды; интенсивности испарения жидкостей от критической высоты «сухого» СГП;

- разработаны методика и экспериментальная установка по определению геометрических параметров СГП, обеспечивающего гашение пламени углеводородных жидкостей в поддонах для сбора локальных проливов.

**Теоретическая значимость** результатов исследования заключается в:

- расширении представлений о возможности применения гранулированного пеностекла для снижения пожарной опасности локальных проливов углеводородных жидкостей;

- в обосновании возможности использования совокупности существующих и новых методов исследования снижения пожарной опасности локальных проливов углеводородных жидкостей;

- научном обосновании условий, способствующих снижению параметров испарения и гашения пламени на основе применения гранулированного пеностекла в условиях пролива углеводородных жидкостей.

**Практическая значимость** результатов исследования заключается в следующем:

- разработана программа для ЭВМ «Пожарная безопасность локальных проливов горючих жидкостей» (Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2021664032 от 27.08.2021, Бюл. №9) и внедрена в образовательный процесс ИПСА ГПС МЧС России при изучении дисциплины «Пожарная безопасность технологических процессов»;

- разработана лабораторная установка для исследования параметров гранулированных материалов с целью улучшения характеристик, снижающих пожарную опасность локальных проливов углеводородных жидкостей.

**Методология и методы исследований.** В основу теоретических исследований положен анализ научных работ по теории фильтрации жидкостей и газов в пористых средах, а также выявление закономерностей, описания, обобщения. Результаты численных расчетов подтверждены результатами экспериментальных исследований с использованием современных поверенных приборов и оборудования.

**На защиту выносятся:**

- математическая модель расчета равновесной высоты «сухого» СГП при проливах углеводородных жидкостей;
- математическая модель расчета критической высоты «сухого» СГП в условиях равновесного состояния, обеспечивающего гашение пламени;
- математическая модель скорости испарения углеводородных жидкостей с экранирующим слоем гранулированного пеностекла;
- зависимости критической высоты «сухого» СГП от площади поддона для сбора локальных проливов углеводородных жидкостей и физико-химических свойств углеводородных сред;
- методика определения геометрических параметров СГП, обеспечивающего гашение пламени углеводородных жидкостей в поддонах площадью до 2,5 м<sup>2</sup>.

**Достоверность результатов исследования** подтверждается следующим: удовлетворительной сходимостью результатов теоретического и экспериментального исследований снижения пожарной опасности пролива углеводородных жидкостей слоем гранулированного пеностекла; проведением экспериментов с использованием поверенного, сертифицированного оборудования; внутренней непротиворечивостью и их согласованностью с данными других исследователей.

**Апробация результатов исследования.** Основные результаты исследований докладывались и обсуждались на международных практических конференциях: IV Международной научно-практической конференции молодых ученых и специалистов «Проблемы техносферной безопасности – 2015 (г. Москва, Академия ГПС МЧС России, 2015); V-й Международной научно-практической конференции молодых ученых и специалистов «Проблемы техносферной безопасности-2016» (г. Москва, Академия ГПС МЧС России, 2016); XXVIII Международной научно-практической конференции (Химки: Академия гражданской защиты МЧС России, 2018); IV Международной научно-практической конференции «Современные пожаробезопасные материалы и технологии»; Международной научно-практической конференции «Пожарная безопасность: современные вызовы. Проблемы и пути решения» - 2020, (СПБУ ГПС МЧС России, 14 апреля 2020); IX Международной научно-практической конференции молодых ученых и специалистов «Проблемы техносферной безопасности – 2020» (Академия ГПС МЧС России, Москва, 7-8 апреля 2020); VIII Всероссийской научно-практической конференции «Актуальные вопросы совершенствования инженерных систем обеспечения пожарной безопасности объектов» (г. Иваново, ИПСА ГПС МЧС России, 20 апреля 2021).

**Материалы диссертации реализованы:** в практической деятельности ООО «ЧИСТЫЙ МИР М» при обеспечении пожарной безопасности техники перед ремонтной подготовкой нефтяных резервуаров в процессе выполнения работ; в практической деятельности Ивановской нефтебазы ООО «Газпромнефть-Терминал» при проведении сливо-наливных операций на железнодорожной сливо-наливной эстакаде, насосной станции и при подготовке к проведению технического обслуживания, ремонта технологических трубопроводов и оборудования Ивановской нефтебазы; в образовательном процессе ИПСА ГПС МЧС России при изучении дисциплины «Пожарная безопасность технологических процессов».

**Публикации.** Материалы диссертационной работы изложены в 13 научных работах, из них – 6 в рецензируемых научных журналах из перечня ВАК Минобрнауки РФ.

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа состоит из введения, 3 глав, заключения, списка литературы из 130 наименований и 8 приложений. Работа изложена на 183 страницах машинописного текста, содержит 100 рисунков и 25 таблиц.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы исследования, степень ее разработанности, сформулированы цель и задачи, определены объект и предмет исследования, представлена научная новизна, указаны теоретическая и практическая значимость, представлены методология и методы исследования, а также приведены данные по апробации результатов работы.

**В первой главе** «Состояние вопроса пожарной опасности локальных проливов углеводородных жидкостей» представлены анализ статистических данных по пожарам на объектах с обращением углеводородных жидкостей, проведен аналитический обзор характерных пожаров, связанных с локальными аварийными проливами ЛВЖ и ГЖ на объектах нефтегазовой отрасли, проведен анализ способов и технических решений, направленных на снижение пожарной опасности локальных проливов углеводородных жидкостей, а также проанализированы свойства гранулированных материалов.

Анализ статистических данных по пожарам на объектах нефтегазовой отрасли показал, что пожары пролива – наиболее частое явление среди сценариев развития пожара. В подавляющем большинстве проливы углеводородных жидкостей на производственных объектах являются локальными, а именно: проливы при разьеме соединительных патрубков после проведения сливо-наливных операций; утечки при нарушении герметичности фланцевых соединений; проливы при подготовке к проведению ремонтных работ на технологических трубопроводах, манифольдах; капельные утечки на технологическом оборудовании и трубопроводах при повышенных вибрационных нагрузках; проливы при отборе проб углеводородных жидкостей из аппаратов.

В отечественных и зарубежных нормах отражены требования, направленные на ограничение растекания горючих жидкостей. Эти требования реализуются путем применения открытых поддонов, ограждающих бортиков, приямков, поддонов с гравием, устройств самотушения горящих жидкостей. При этом в действующих нормативных документах отсутствуют требования, предъявляемые к гранулированным наполнителям поддонов в виде легких пористых материалов, в частности, к гранулированному пеностеклу.

Анализ характеристик гранулированных материалов показал, что гранулированное пеностекло марки «Термоизол» является одним из самых низкогигроскопичных, легких и термостойких материалов с низким коэффициентом теплопроводности. Технологическая линия производства гранулированного пеностекла предусматривает фракционное разделение гранул: Ф1-4; Ф5-7; Ф10-15; Ф20-30 (мм). При меньшем размере фракции больше насыпная плотность и, соответственно, меньше высота «сухого» СГП в равновесном состоянии. Высота «сухого» СГП является доминирующим параметром в процессе снижения интенсивности испарения и гашения пламени при проливе ЛВЖ. В связи с этим возникла необходимость определения оптимального размера фракции СГП, выполняющего роль экрана при проливе углеводородных жидкостей на ограниченной поверхности, минимальная величина которого обеспечивает гашение пламени.

**Во второй главе** «Теоретические исследования испарения углеводородных жидкостей и гашения пламени в условиях экранирования пролива слоем гранулированного пеностекла» разработаны: математическая модель расчета равновесной высоты «сухого» слоя гранулированного пеностекла при проливах углеводородных жидкостей; математическая модель расчета критической высоты «сухого» СГП на поверхности пролива углеводородных жидкостей, обеспечивающего гашение пламени; математическая модель скорости испарения углеводородных жидкостей с экранирующим слоем гранулированного пеностекла.

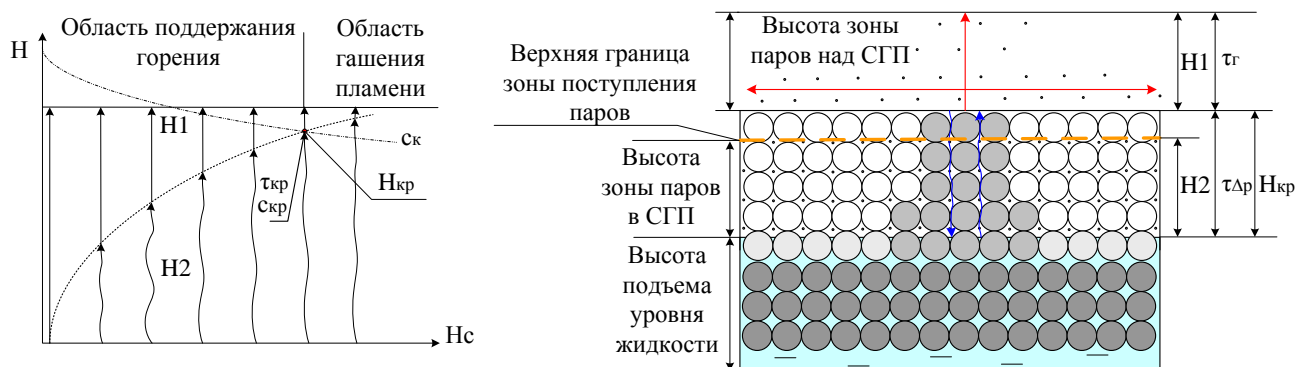
В основе теории диффузионного горения заложен принцип неразрывности процесса испарения жидкости и подвода горючих паров в зону реакции горения. Для поддержания горения необходимо, чтобы с надлежащей скоростью поступало необходимое количество паров жидкости и кислорода в зону реакции горения. Нарушению временного баланса поддержания горения углеводородных жидкостей способствует критическая высота «сухого» СГП, при которой горение не поддерживается, при этом выполняется условие:

$$\tau_2 < \tau_{n.z.}, \quad (1)$$

где  $\tau_2$  – время сгорания объема паров над поверхностью жидкости, с;  $\tau_{n.z.}$  – время поступления горючего в зону реакции горения, с.

В условиях пролива углеводородной жидкости в емкость, наполненной СГП, процесс гашения пламени можно описать, используя график-схему, представленную на рисунке 1.





$H_1$  – высота зоны паров, испарившихся с поверхности СГП;  $H_2$  – высота зоны паров, испарившихся с поверхности жидкости в СГП;  $H_{кр}$  – критическая высота зоны паров;  $\tau_r$  – время сгорания паров;  $\tau_{\Delta p}$  – время распространения волны при перепаде давления;  $\tau_{кр}$  – критическое время распространения волны при перепаде давления;  $c_k$  – концентрация кислорода.

Рисунок 1 – График-схема гашения пламени при критической высоте «сухого» СГП

Нарушение баланса горения с увеличением высоты (толщины) СГП характеризуется следующими факторами:

1) При сгорании объема паров над поверхностью СГП происходит обеднение кислородом области внутри «сухого» СГП, поэтому пламя не опускается ниже верхнего уровня СГП, что приводит к снижению температуры внутри слоя гранул;

2) Давление над поверхностью СГП падает, инициируя волну, распространяющуюся к поверхности жидкости и обратно, перепад давления  $\Delta p/l$  происходит за определенный промежуток времени  $\tau_{\Delta p}$ ;

3) Высота зоны паров  $H_2$  в СГП не достигает зоны реакции горения  $H_1$  за время  $\tau_2$  ( $H_{кр} \geq H_2$ ;  $\tau_2 < \tau_{кр}$ ).

При сгорании паров над поверхностью «сухого» СГП инициируется волна, вектор которой направлен к поверхности жидкости через СГП и обратно. Характерное время распространения такой волны, т.е. время «перепада давления»  $\tau_{\Delta p}$  (с) можно оценить по формуле, полученной из уравнения фильтрации жидкости (пара) в пористых средах по закону Дарси:

$$\tau_{\Delta p} = \frac{l^2 \cdot m \cdot \mu}{2 \cdot k \cdot P_n}, \quad (2)$$

где  $l$  – длина криволинейного канала, м;  $m$  – пористость слоя;  $\mu$  – динамическая вязкость пара Па·с;  $k$  – коэффициент проницаемости пористой среды, м<sup>2</sup>;  $P_n$  – давление насыщенного пара (Па).

Если принять длину криволинейного канала равной высоте «сухого» СГП, то есть  $l = H_c$  и провести эксперимент по определению высоты «сухого» СГП, при которой горение углеводородных жидкостей не поддерживается, то можно записать условие гашения пламени в следующем виде:

$$H_{кр} \geq \sqrt{\frac{2 \cdot k \cdot P_n}{m \cdot \mu} \cdot \tau_{\Delta p}}, \quad (3)$$

где  $H_{кр}$  – критическая высота «сухого» СГП.

При локальной утечке горючей жидкости уровень ее разлива в емкости увеличивается, вместе с ним уменьшается высота «сухого» СГП, а при переходе СГП в равновесное состояние под действием архимедовой силы (наихудший вариант развития аварии) данная высота остается постоянной. Для выполнения условия гашения пламени (3) необходимо, чтобы выполнялось условие:

$$H_c \geq H_{кр} \quad (4)$$

Высоту «сухого» СГП в условиях равновесного состояния можно определить по полученной формуле:

$$H_c = \left( \left( 1 - \frac{\rho_z}{\rho_{жс} \cdot (1-m)} \right) \cdot H \right) - h_k, \quad (5)$$

где  $\rho_{жс}$  – плотность жидкости, кг/м<sup>3</sup>;  $\rho_z$  – насыпная плотность гранул, кг/м<sup>3</sup>;  $H$  – общая высота слоя, м;  $h_k$  – высота капиллярного подъема, м, которая определялась по преобразованной формуле Жюрена:

$$h_k = \frac{2 \cdot \sigma}{g \cdot \rho_{жс} \cdot \bar{d}_k}, \quad (6)$$

где  $\sigma$  – поверхностное натяжение, мН/м;  $g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;  $\bar{d}_k$  – средний эквивалентный диаметр канала, м.

Расчетная зависимость высоты капиллярного подъема уровня от поверхностного натяжения жидкостей представлена на рисунке 2.

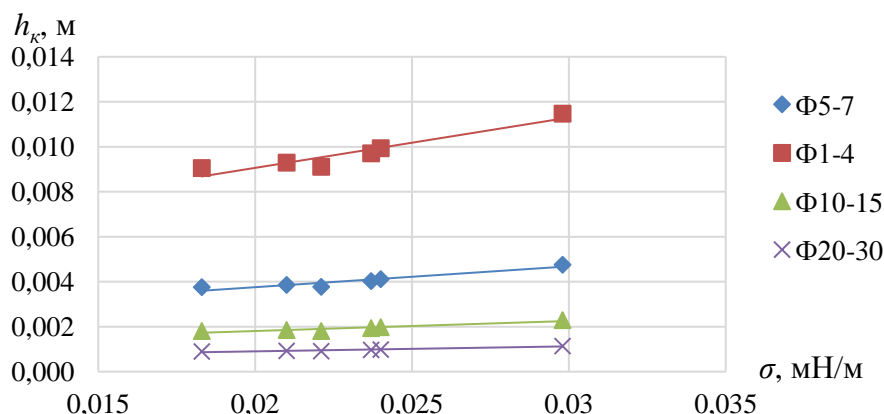


Рисунок 2 – Зависимость высоты капиллярного подъема уровня от поверхностного натяжения жидкостей

Из графика (рисунок 2) следует, что фракция пеностекла Ф1-4 (мм) имеет максимальную из исследуемых фракций высоту капиллярного подъема жидкости, что в совокупности с наибольшей насыпной плотностью данной фракции делает высоту «сухого» СГП минимальной.

Истинная пористость СГП определялась по формуле:

$$m = 1 - \frac{(h - h_0) \cdot S}{V_m}, \quad (7)$$

где  $S$  – площадь поверхности емкости, м<sup>2</sup>;  $h_0$  – начальная высота столба жидкости, м;  $h$  – высота столба жидкости после погружения СГП, м;  $V_m$  – объем, занимаемый гранулированной средой, м<sup>3</sup>.

Пористость СГП разных фракций определялась экспериментально путем погружения объема гранул в емкость с нагретой до 90°C водой. По результатам эксперимента получены следующие значения  $m$ : 1-4 мм (0,365); 5-7 мм (0,385); 10-15 мм (0,390); 20-30 мм (0,410).

Для проверки работоспособности модели (5) были проведены эксперименты с различными ЛВЖ в емкости из стекла диаметром 15 см с СГП исследуемых фракций высотой от 7,5 см до 22,5 см (с шагом 1,5). Суть эксперимента состояла в многократном измерении высоты «сухого» СГП в условиях равновесного состояния. В качестве примера на рисунке 3 приведены зависимости высоты «сухого» СГП от плотности жидкости, полученные по формуле (5) для общего слоя гранул пеностекла высотой 15 см, находящегося в равновесном состоянии:

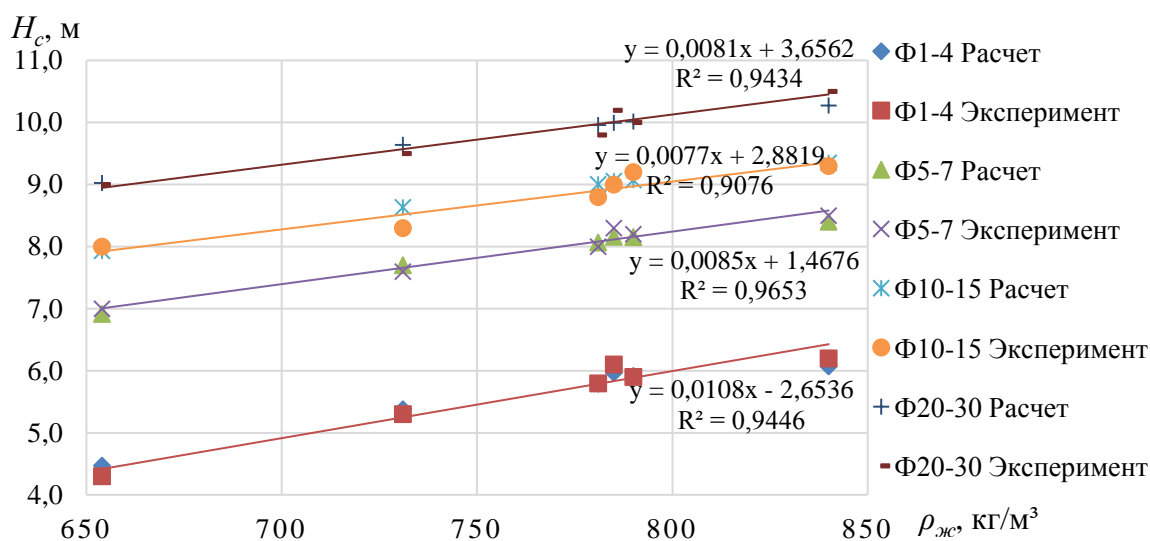


Рисунок 3 – Зависимость высоты «сухого» СГП от плотности жидкости при общей высоте СГП равной 15 см

Разработанная математическая модель расчета равновесной высоты «сухого» СГП позволяет определять высоту «сухого» СГП, находящегося на поверхности жидкости плотностью  $\rho_{жс} \approx 654 \dots 840 \text{ кг/м}^3$  с коэффициентом корреляции  $>0,9$ .

Для определения зависимости скорости испарения углеводородных жидкостей от высоты «сухого» СГП была разработана математическая модель скорости испарения углеводородных жидкостей:

$$v(H_c) = v_0 \cdot \exp(-k_s \cdot H_c) , \quad (8)$$

где  $v_0$  – массовая скорость испарения жидкости без экрана СГП, г/с;  $H_c$  – высота «сухого» СГП, м;  $k_s$  – коэффициент экранирования, который можно оценить, используя формулу:

$$k_s = \frac{1}{H_c} \cdot \ln \left( \frac{v}{v_0} \right) \quad (9)$$

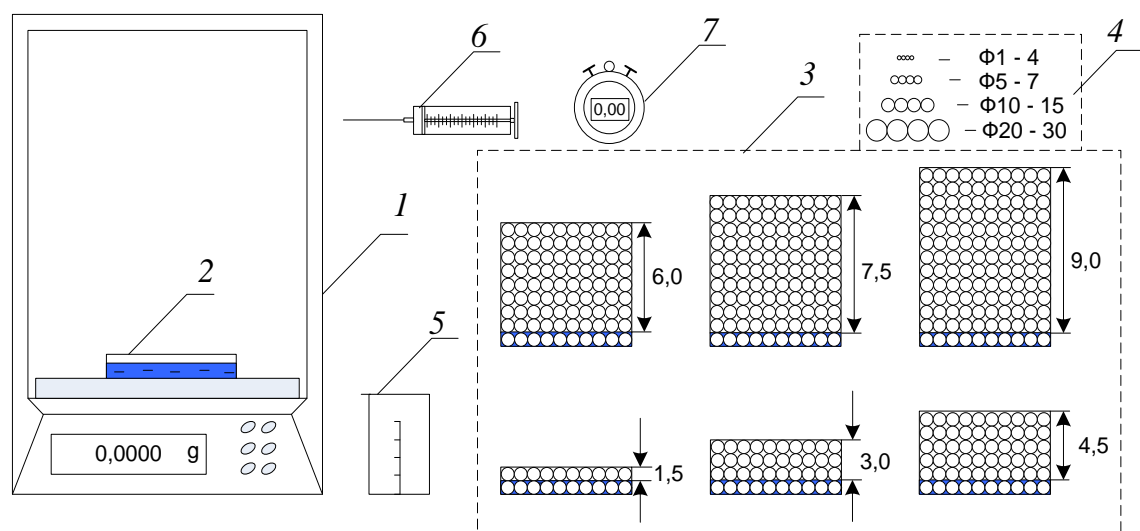
Таким образом, с помощью математической модели скорости испарения углеводородных жидкостей при экранировании СГП можно оценить массовую

скорость испарения углеводородных жидкостей различных классов, в том числе и при критической высоте «сухого» СГП, обеспечивающего гашение пламени при выполнении условия (3).

**В третьей главе** «Экспериментальные исследования эффективности экранирования испарения и горения углеводородных жидкостей гранулированным слоем пеностекла»: определены граничные условия проведения эксперимента; представлены результаты лабораторных и полигонных экспериментов по оценке параметров испарения и гашения пламени углеводородных жидкостей экранирующим СГП, разработана методика и экспериментальная установка по определению геометрических параметров СГП, обеспечивающего гашение пламени углеводородных жидкостей в поддонах для сбора локальных проливов.

С целью проверки адекватности моделей испарения углеводородных жидкостей и гашения пламени при экранировании поверхности пролива СГП были проведены лабораторные и полигонные эксперименты, а полученные результаты обработаны с помощью статистических методов анализа.

Исследование процесса испарения углеводородных жидкостей через СГП четырех фракций пеностекла при различной высоте «сухого» СГП (1,5 ... 9 см с шагом 1,5) проводилось в лабораторных условиях с целью определения фракции пеностекла, при которой интенсивность испарения будет минимальна. Подготовленные, взвешенные образцы СГП размещались в химически-стойких полипропиленовых емкостях диаметром 115 мм. Исследуемая жидкость наливалась в центр емкости под слой СГП до уровня 10 мм от основания емкости, после чего емкость с СГП устанавливалась на аналитические весы *GR-300*. Показания весов снимались через каждые 60 секунд в течение 15 минут. Схема лабораторного оборудования для исследования испарения жидкостей представлена рисунке 4.



1 – электронные весы; 2 – емкость с жидкостью; 3 – емкости с СГП и жидкостью; 4 – фракции СГП; 5 – мерный стакан; 6 – шприц; 7 – секундомер.

Рисунок 4 – Схема лабораторного оборудования для исследования испарения жидкостей с подложками из гранулированного пеностекла

Интенсивность испарения жидкостей определялась по формуле:

$$W = \frac{m_n}{F_u \cdot T}, \quad (10)$$

где  $m_n$  – экспериментальная масса паров углеводородных жидкостей, г;  $T$  – время испарения, с;  $F_u$  – площадь емкости, м<sup>2</sup>.

Осредненные значения интенсивности испарения  $W'$  бензина АИ-92 при экранировании пролива СГП представлены на рисунке 5.

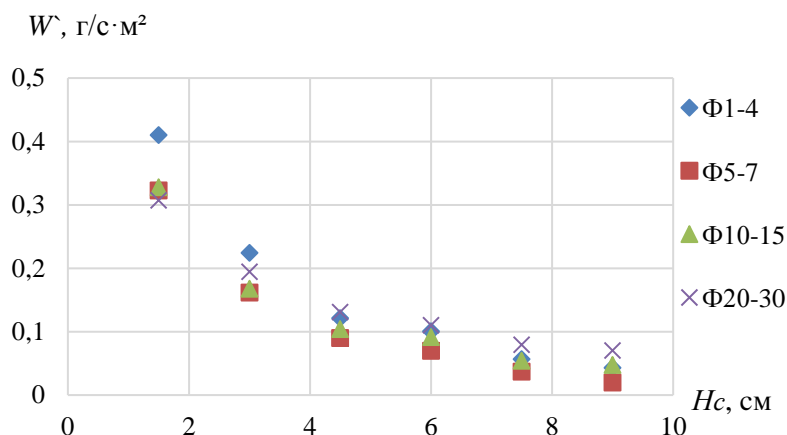


Рисунок 5 – Зависимость интенсивности испарения бензина АИ-92 от высоты «сухого» СГП

Установлено, что с увеличением высоты «сухого» СГП интенсивность испарения снижается экспоненциально. В порядке возрастания интенсивности испарения бензина АИ-92 через СГП фракции распределились следующим образом: 1) 5-7, 2) 10-15, 3) 1-4, 4) 20-30 (мм). Высокая интенсивность испарения жидкостей через СГП фракции 1-4 мм обусловлена наименьшей высотой «сухого» слоя относительно общей высоты СГП и значительным влиянием капиллярных сил, у фракции 20-30 мм высокие значения  $W'$  объясняются низким сопротивлением движению пара из-за высокой пористости слоя.

Следующая серия экспериментов по оценке массы паров ЛВЖ различной функциональной группы (ацетон, бензин, гексан, этиловый спирт, керосин и дизельное топливо) проводилась на СГП фракции 5-7 мм. По результатам эксперимента средний коэффициент экранирования, рассчитанный по формуле (9), составил  $0,39 \pm 0,03$ , что близко к значению пористости фракции 5-7 мм ( $m = 0,385$ ).

Высота зоны, ограниченная НКПР паров углеводородных жидкостей, определялась по известной формуле:

$$Z_{нкпр} = 0,26 \cdot \left( \frac{m_n}{\rho_n \cdot C_{нкпр}} \right)^{0,33}, \quad (11)$$

где  $m_n$  – масса паров ЛВЖ, испарившихся через слой СГП, кг;  $\rho_n$  – плотность паров углеводородных жидкостей, кг/м<sup>3</sup>;  $C_{нкпр}$  – НКПР паров ЛВЖ, %, об.

На основе полученных экспериментальных данных массы паров жидкости, испарившихся через «сухой» СГП различной высоты по формуле (11), была

проведена оценка высоты зоны, ограниченной НКПР паров углеводородных жидкостей, часть результатов которой представлена на рисунке 6.

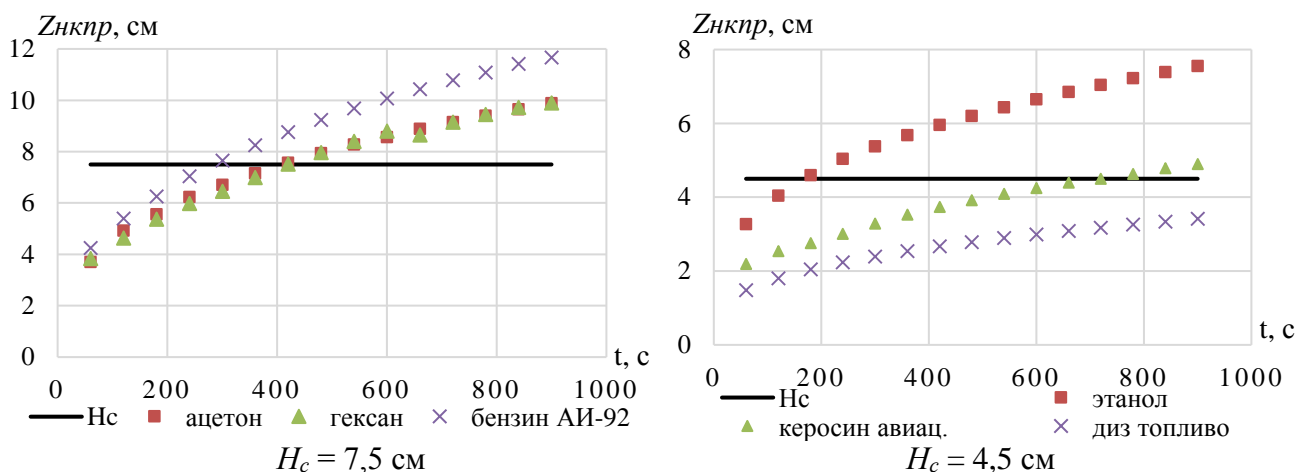
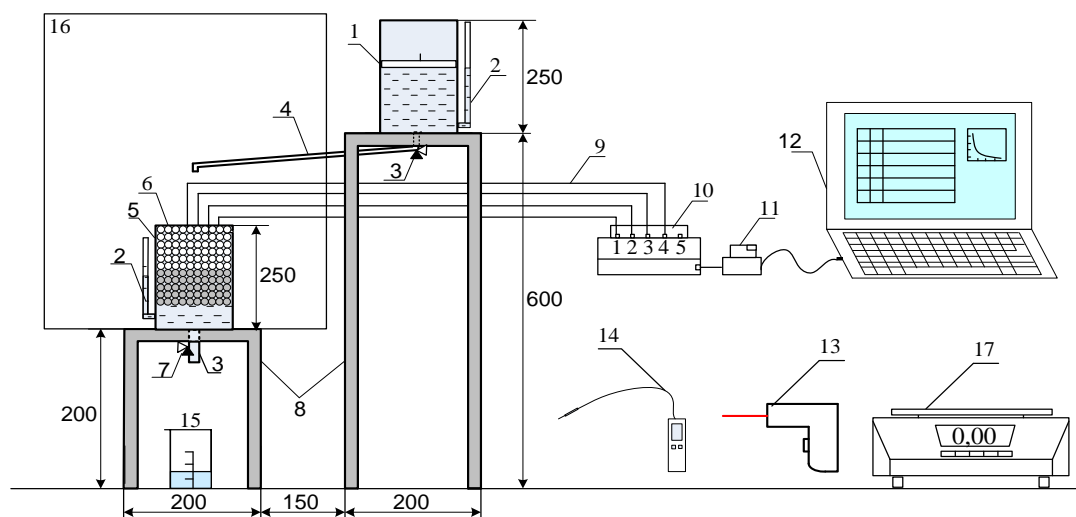


Рисунок 6 – Зависимость высоты зоны, ограниченной НКПР паров углеводородных жидкостей, от времени испарения

Анализ результатов расчета высоты зоны, ограниченной НКПР паров углеводородных жидкостей, показал следующее: в начале процесса испарения исследуемых жидкостей высота зоны  $Z_{нкпз}$  находится ниже верхней отметки «сухого» СГП и для ее пересечения может потребоваться достаточно продолжительное время, что подтверждает гипотезу о нарушении временного баланса горения жидкостей.

Для экспериментального определения критической высоты «сухого» СГП разработана лабораторная установка, схема которой представлена на рисунке 7.



1 – емкость для ЛВЖ с плавающей крышкой; 2 – мерная трубка; 3 – кран; 4 – сливной трубопровод; 5 – емкость для СГП; 6 – гранулированная подложка; 7 – сливной кран; 8 – станина; 9 – термоэлектрические преобразователи; 10 - модуль ввода аналоговый МВА-8; 11 – преобразователь интерфейсов RS-485; 12 – персональный компьютер (ПК); 13 – тепловизор Fluke Ti 20; 14 – термоанемометр Testo 425; 15 – емкость для слива; 16 – миллиметровая бумага; 17 – весы лабораторные электронные AND GX-4000

Рисунок 7 – Схема лабораторной установки по определению параметров гашения пламени углеводородных жидкостей СГП

Испытание образцов СГП проводилось в 2 этапа: на первом этапе определялась критическая высота «сухого» СГП, при которой происходит гашение пламени; на втором этапе измерялось время сгорания паров жидкости, интенсивность испарения и удельная массовая скорость выгорания жидкости на пределе гашения пламени.

Для проведения испытаний подготовлены: металлическая емкость для ЛВЖ  $d=150$  мм с плавающей крышкой 1; емкости для СГП 5 круглого и прямоугольного сечения; мерные трубки 2 и сливные патрубки 3; емкость 1 оборудована сливным трубопроводом 4 с внутренним диаметром 15 мм. Емкости размещались на станинах 8, для измерения температур в слое СГП устанавливались термоэлектрические преобразователи КТХА на расстоянии 5 мм, 15 мм от верхнего уровня СГП и выше границы «сухого» СГП на 5 мм. Через модуль ввода аналоговый МВА-8 10 и преобразователь интерфейсов RS-485 11 подключались к персональному компьютеру 12, температурные поля снимались тепловизором Fluke Ti20 13, температура и скорость движения воздуха измерялась термоанемометром Testo 425 14, слив жидкости осуществлялся в емкость 15, для фиксации геометрических параметров пламени на стене размещалась миллиметровая бумага 16. Инициирование горения производилось лучиной, через 1 минуту после начала горения медленно открывался сливной кран 7 и производился слив ЛВЖ в мерный стакан до момента гашения пламени, затем кран перекрывался, по градуированной мерной трубке определялся уровень жидкости, разница между высотой СГП и уровнем жидкости в емкости 5 являлась критической высотой «сухого» СГП  $H_{кр}$ . Эксперимент повторялся пять раз, осредненные значения  $H_{кр}$ , при которых происходит гашение пламени представлены на рисунке 8.

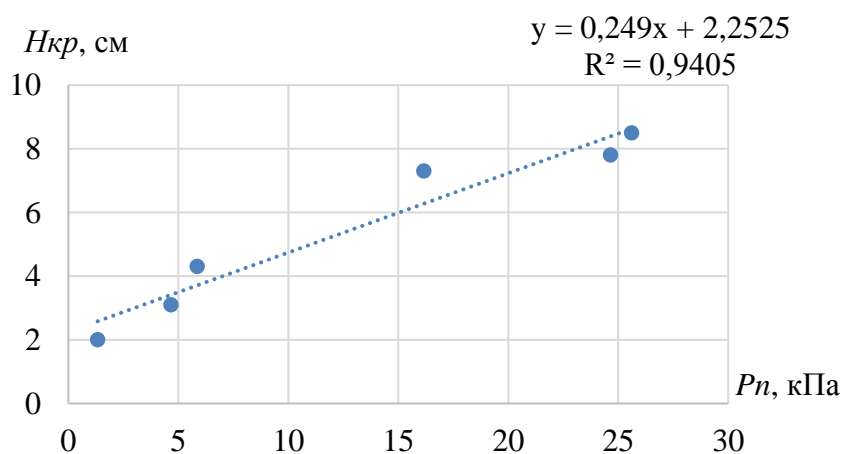


Рисунок 8 – Зависимость критической высоты «сухого» СГП от давления насыщенных паров

Определив значения критической высоты «сухого» СГП  $H_{кр}$ , время «перепада давления»  $\tau_{\Delta p}$  рассчитывалось по формуле (2). Распределение значений  $H_{кр}$  наиболее точно описывается линейной зависимостью с функцией  $y = ax + b$ , поэтому выражение (3) будет иметь вид:

$$H_{кр} = a \sqrt{\frac{2 \cdot k \cdot P_n \cdot \tau_{\Delta p}}{m \cdot \mu}} + b, \quad (12)$$

где

$$\sqrt{\frac{2 \cdot k \cdot P_n \cdot \tau_{\Delta p}}{m \cdot \mu}} = x, \quad (13)$$

тогда  $H_{кр}$  можно представить в виде:

$$H_{кр} = a \cdot x + b \quad (14)$$

Определив  $x$  для каждой из исследуемых жидкостей, вычислялись коэффициенты  $a$  и  $b$  для соответствующих  $x$  методом наименьших квадратов.

Экспериментальная  $H_{кр}(\varepsilon)$  и расчетная зависимости  $H_{кр}(p)$  от параметра  $x$  по результатам лабораторных испытаний представлены на рисунке 9.

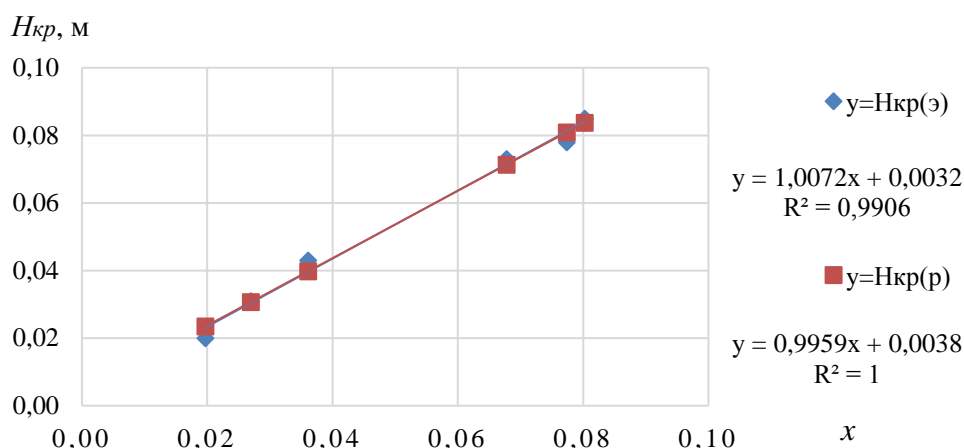
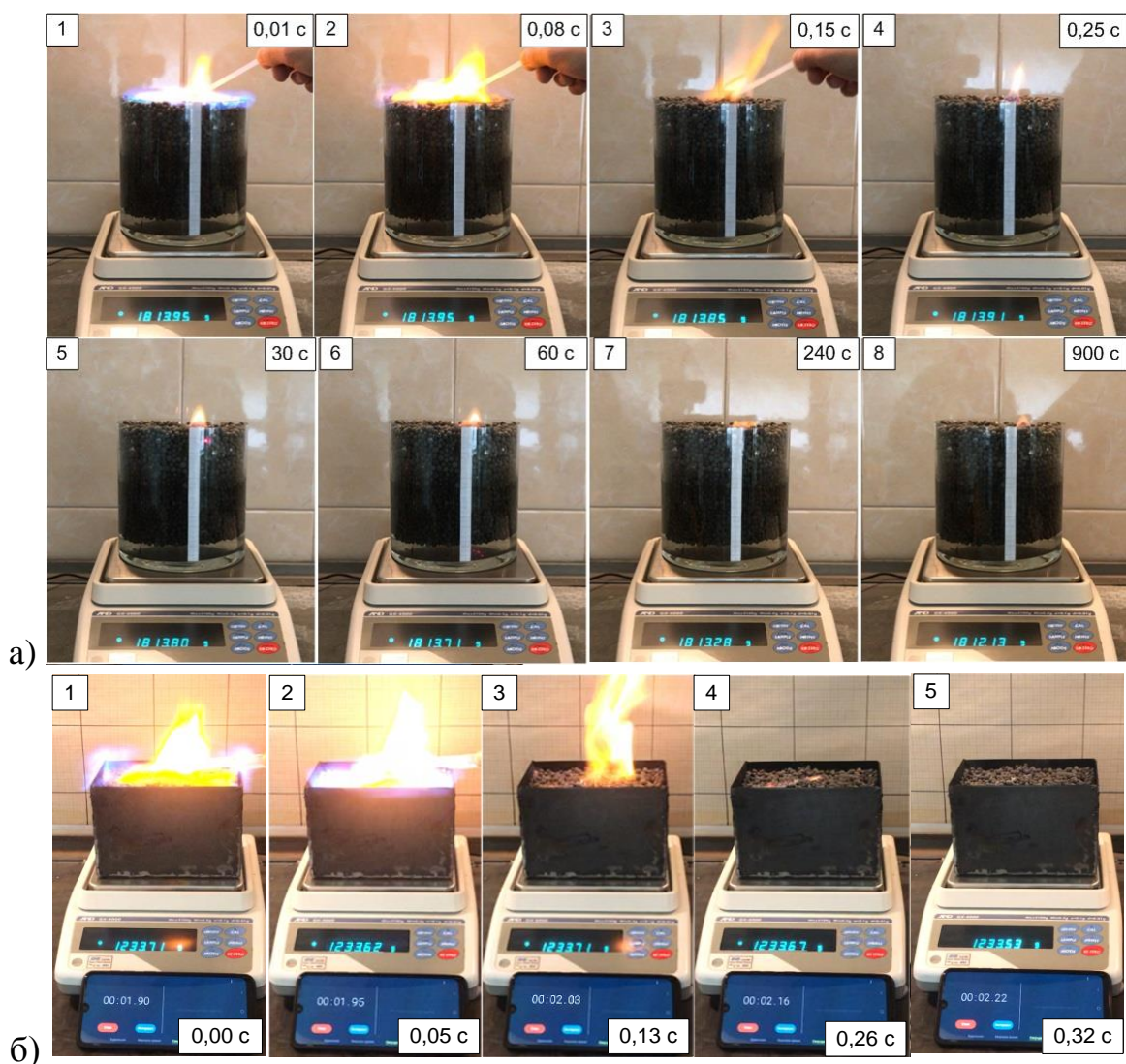


Рисунок 9 – Зависимости критической высоты «сухого СГП  $H_{кр}$  от параметра  $x$

Для точного измерения убыли массы при горении жидкостей использовались аналитические электронные весы AND GX-4000 с дискретностью отсчета от 0,01 г 17 (рисунок 7), а также емкости: круглого сечения из термостойкого стекла диаметром 150 мм и высотой 150 мм и прямоугольного сечения из стали марки ст. 3 толщиной 1,5 мм со сторонами 112 x 157 мм. Время сгорания паров над поверхностью СГП измерялось секундомером и фиксировалось на видеокамеру. В ходе экспериментов оценивалась скорость горения и удельная массовая скорость выгорания углеводородных жидкостей в условиях равновесного состояния СГП при минимальном устойчивом пламени.

Эксперименты по определению параметра  $H_{кр}$  позволили установить следующее: при высоте «сухого» слоя ниже на 10-20 % от  $H_{кр}$  горение происходит на пределе гашения пламени в устойчивом ламинарном режиме, площадь основания пламени смещается к центру емкости, уменьшаясь в несколько раз. Последовательная серия кадров эксперимента по определению времени сгорания паров углеводородных жидкостей и измерению массы при горении жидкостей на аналитических электронных весах представлена на рисунке 10.





а) вспышка и горение гексана на пределе гашения пламени  $H_c = 6$  см  
 б) вспышка паров ацетона без последующего горения  $H_c = 8$  см  
 Рисунок 10 – Последовательная серия кадров эксперимента

При сгорании паровоздушного облака зафиксирован «скачок» (относительно быстрое изменение) массы  $m_l$  на весах у ряда исследуемых жидкостей (ацетон, бензин АИ-92, гексан, этанол), что говорит о перепаде давления в СГП, вызванное быстрым сгоранием паров (вспышкой). Расчетное время сгорания паровоздушной смеси отличалось от полученных экспериментальных значений в пределах погрешности не более, чем на 10 %.

При установившемся режиме горения, максимальная температура паровой фазы в слое СГП на расстоянии от основания пламени: - 5 мм (точка 1) варьируется 210 – 254 °С; - 15 мм от основания пламени (точка 2) температура значительно снижается и входит в диапазон 115 – 136 °С; на границе раздела паровой и жидкой фазы (точка 3) температура находится в пределах 62 – 74 °С, что близко к температуре кипения бензина, гексана, этанола.

Зависимость высоты пламени от высоты «сухого» СГП при горении исследуемых ЛВЖ в емкости диаметром 150 мм представлена на рисунке 11.

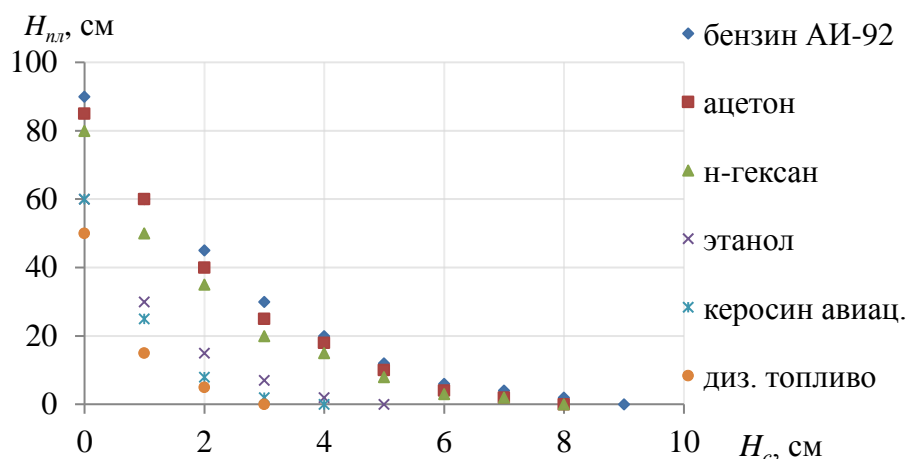


Рисунок 11 – Зависимость высоты пламени  $H_{пл}$  от высоты «сухого» СГП  $H_c$

Анализ результатов экспериментов показал, что с увеличением высоты «сухого» СГП высота пламени снижается экспоненциально, а при значениях «сухого» СГП близких к  $H_{кр}$  значительно уменьшается площадь основания пламени и прекращаются пульсации пламени.

Зависимость удельной массовой скорости выгорания жидкости на пределе гашения пламени от критической высоты «сухого» СГП представлена на графике, рисунок 12.

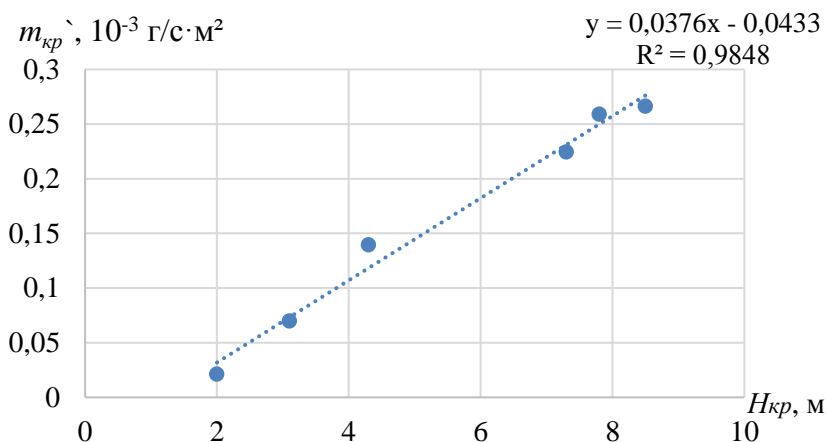


Рисунок 12 – Зависимость критической удельной массовой скорости выгорания углеводородных жидкостей от критической высоты «сухого» СГП

В ходе полигонных испытаний оценивалась высота «сухого» СГП, при котором происходит гашение пламени в поддонах для сбора локальных проливов углеводородных жидкостей различной площади, а также удельная массовая скорость выгорания жидкостей при экранировании пролива жидкости «сухим» СГП и интенсивность испарения жидкостей.

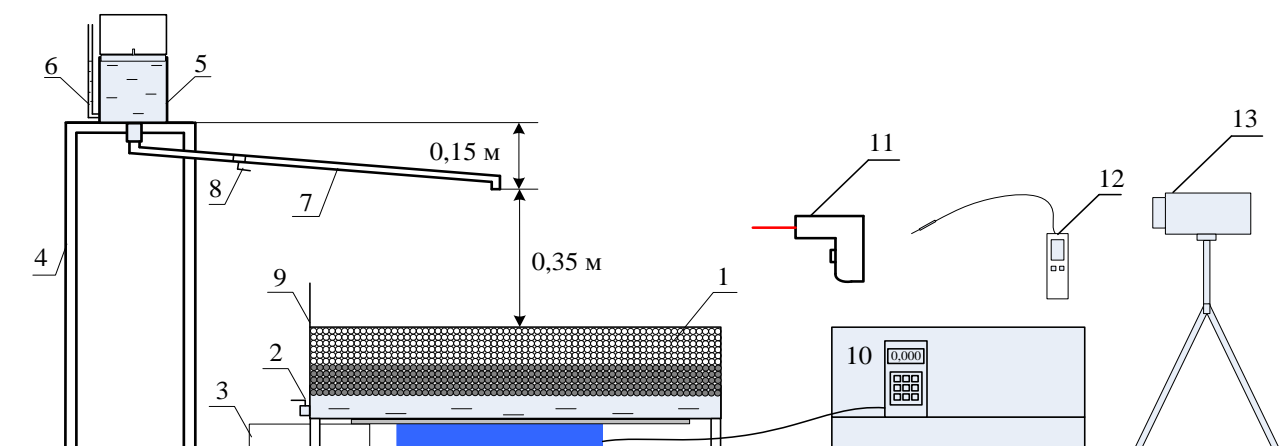
Для проведения испытаний были разработаны переносные поддоны из металла ст.3 толщиной 2 мм, оборудованные патрубками слива и шаровыми кранами с фильтром из металлической сетки для предотвращения засора сливного патрубка гранулами пеностекла. Размеры поддонов сведены в таблицу 1.

Таблица 1 – Размеры поддонов для полигонных испытаний

Параметр	ЛЕ	М	П <sub>1</sub>	М	П <sub>2</sub>	М	П <sub>3</sub>	М
длина, м	0,112	1:1	0,500	1:4,5	0,850	1:7,6	1,190	1:9,3
ширина, м	0,157	1:1	0,700	1:4,5	1,190	1:7,6	1,405	1:9,3
площадь S, м <sup>2</sup>	0,018	1:1	0,35	1:19,9	1,01	1:57,5	1,50	1:85,5

Примечание: ЛЕ – лабораторная емкость; П<sub>1</sub>, П<sub>2</sub>, П<sub>3</sub> – поддоны для полигонных испытаний; М – масштаб.

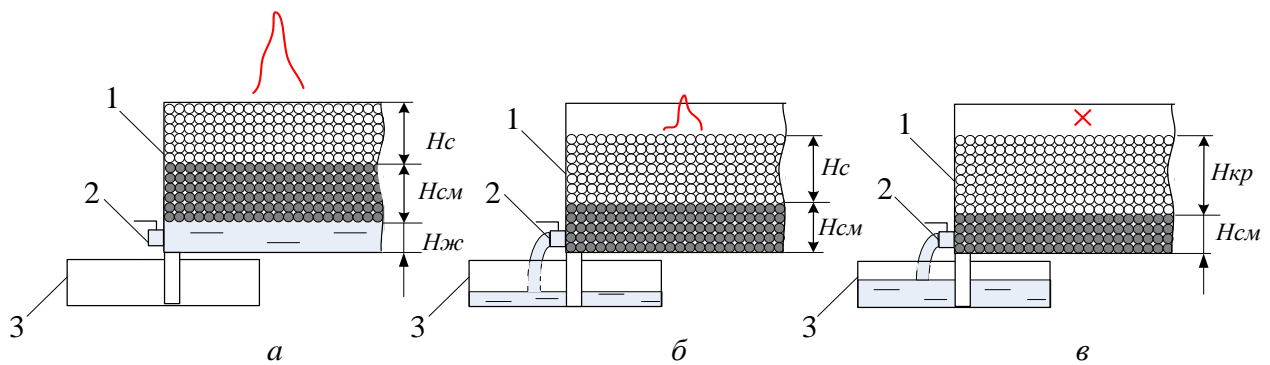
В качестве экранирующего материала использовалось гранулированное пеностекло марки «Термоизол» фракции 5-7 мм. Углеводородные жидкости (ацетон, бензин АИ-92, н-гексан; этанол, керосин авиационный, дизельное топливо зимнее) наливались через сливной трубопровод емкости с ЛВЖ в центр поддона для сбора пролива углеводородных жидкостей со сливным трубопроводом, расположенном на весах *Value VES 50A* с дискретностью 1 г, погрешность  $\pm 0,05\%$ . Для фиксации области горения использовался тепловизор *Fluke Ti20*. Температура и скорость воздуха измерялась термоанемометром *Testo 425*. Уровень жидкости измерялся металлической линейкой (щупом). Время фиксировалось электронным секундомером с дискретностью отсчета – 0,01 с. Схема полигонного экспериментального стенда представлена на рисунке 13.



1 – поддон с СГП; 2 – сливной патрубок с краном; 3 – емкость для сбора ЛВЖ; 4 – станина; 5 – емкость для ЛВЖ; 6 – мерная трубка; 7 – сливной трубопровод; 8 – кран шаровый; 9 – измерительная линейка (щуп); 10 – весы Value VES 50A; 11 – тепловизор Fluke Ti20; 12 – термоанемометром Testo 425; фото-видеокамера

Рисунок 13 – Схема полигонного экспериментального стенда для исследования параметров гашения пламени локальных проливов ЛВЖ

Схема определения критической высоты «сухого» СГП методом слива углеводородной жидкости представлена на рисунке 14.



$H_c$  – толщина «сухого» СГП;  $H_{см}$  – толщина смоченного СГП;  $H_{жс}$  – высота уровня жидкости свободной от СГП;  $H_{кр}$  – критическая высота «сухого» СГП

Рисунок 14 – Схема определения критической высоты «сухого» СГП

Зависимость расчетных значений критической высоты «сухого» СГП от параметра  $x$  для поддонов разной площади представлена на рисунке 15, а кросс-плот расчетных и экспериментальных значений критической высоты «сухого» СГП для общей многопараметрической зависимости представлен на рисунке 16.

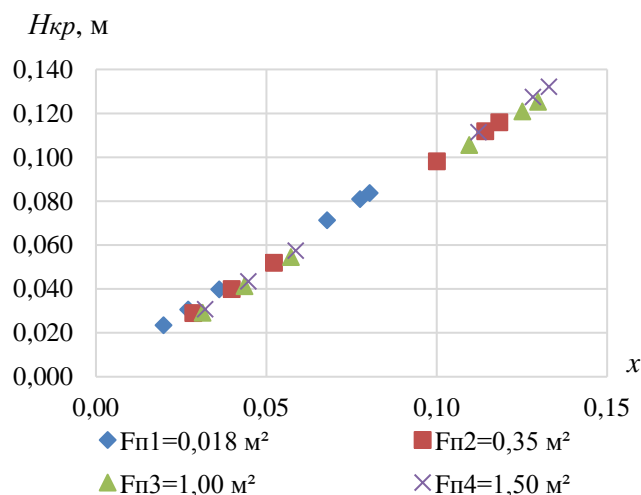


Рисунок 15 – Зависимость расчетных значений критической высоты «сухого» СГП от параметра  $x$  для поддонов разной площади

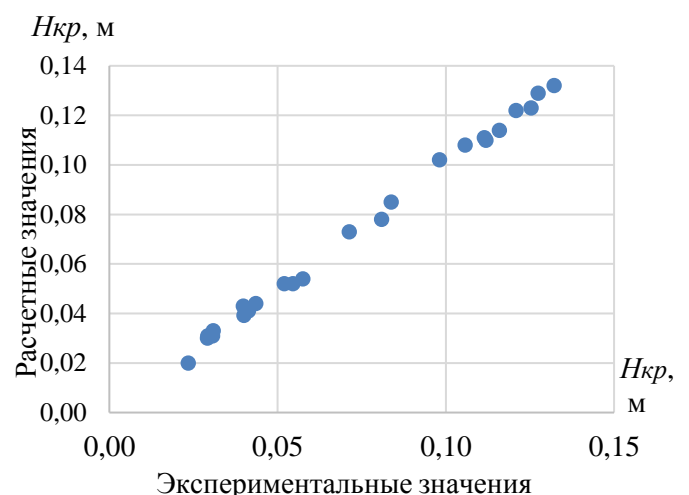
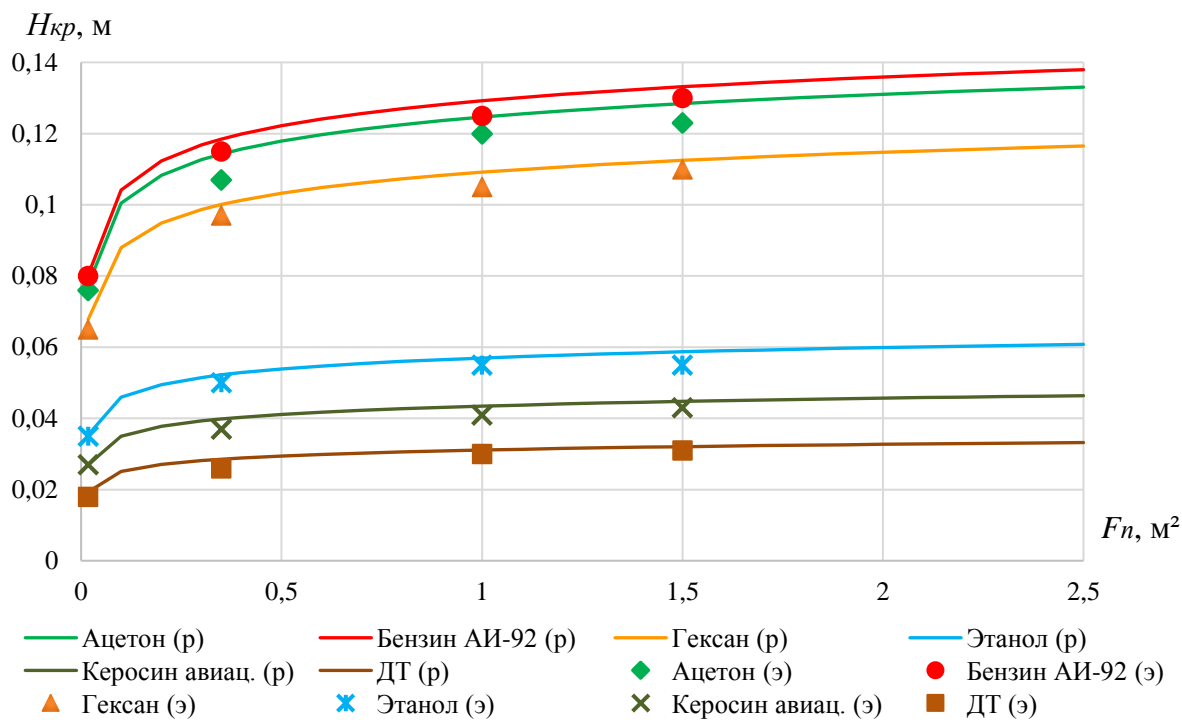


Рисунок 16 – Кросс-плот расчетных и экспериментальных значений критической высоты «сухого» СГП

Погрешность результатов измерений не превышает 10 %, а отклонение экспериментальных от расчетных значений критической высоты «сухого» СГП не превышает 5 %. Расчетное значение получено по выведенной зависимости, а фактическое по результатам проведенных полигонных испытаний.

Распределение критической высоты «сухого» СГП для различной площади поддона приведена на рисунке 17.



р – расчет; э – эксперимент

Рисунок 17 – Распределение критической высоты «сухого» СГП от площади поддона

Распределение критической удельной массовой скорости выгорания углеводородных жидкостей в зависимости от параметра  $x$  представлено на рисунке 18, а распределение интенсивности испарения углеводородных жидкостей в зависимости от критической высоты «сухого» СГП, при котором горение не поддерживается, представлено рисунке 19.

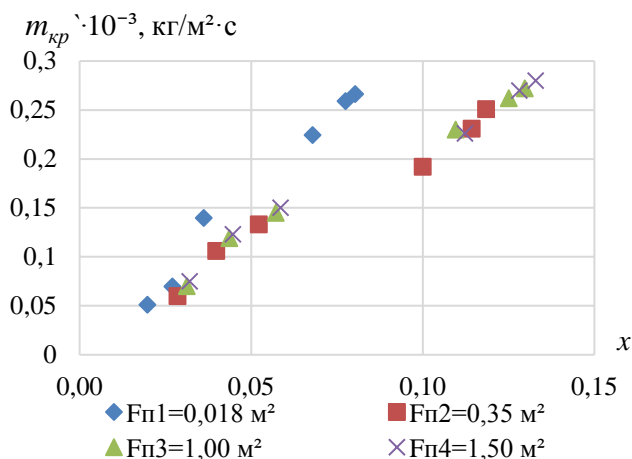


Рисунок 18 – Распределение критической удельной массовой скорости выгорания углеводородных жидкостей в зависимости от параметра

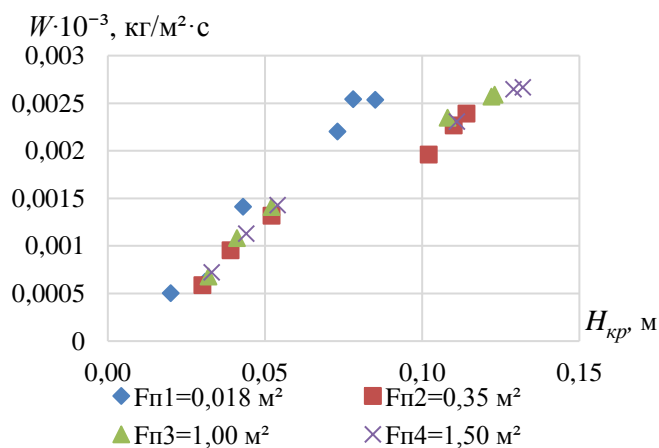


Рисунок 19 – Распределение интенсивности испарения углеводородных жидкостей в зависимости от критической высоты «сухого» СГП, при котором горение не поддерживается

По результатам анализа и обработки экспериментальных данных были получены зависимости, результаты которых сведены в таблицу 2.

Таблица 2 – Результаты полученных зависимостей

Площадь поддона, $F_n, \text{м}^2$	Критическая удельная массовая скорость выгорания $m_{кр} \cdot 10^{-4}$ , $\text{кг}/\text{м}^2 \cdot \text{с}$	Критическая высота «сухого» СГП $H_{кр}$ , м	Интенсивность испарения при условии $H_c = H_{кр}$ $W \cdot 10^{-6}$ , $\text{кг}/\text{м}^2 \cdot \text{с}$
0,35	$m_{кр} = 1,8449x + 0,0229$ (15)	$H_{кр} = \frac{W - 0,0002}{0,019}$ (18)	$W = 1,9174 \sqrt{\frac{P_n}{4,0013}}$ (21)
1,00	$m_{кр} = 1,8927x + 0,0265$ (16)	$H_{кр} = \frac{W - 0,0002}{0,0194}$ (19)	
1,50	$m_{кр} = 1,8538x + 0,0303$ (17)	$H_{кр} = \frac{W - 0,0003}{0,0184}$ (20)	

Таким образом, в третьей главе работы установлено следующее: критическая высота «сухого» СГП и критическая удельная массовая скорость выгорания жидкости зависят от площади поддона, физико-химических свойств углеводородных сред, физических свойств СГП, при этом критическую высоту «сухого» СГП можно найти, определив интенсивность испарения жидкости по полученной зависимости от давления насыщенных паров при условии  $H_c = H_{кр}$ .

В заключении обобщены основные научные и практические выводы исследования.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Аналитический обзор отечественных и зарубежных разработок, направленных на снижение параметров испарения и горения жидкостей с использованием гранулированных материалов, выявил недостаточную изученность вопросов выбора гранулометрического состава и минимальной критической высоты «сухого» СГП, при которой значительно снижаются параметры испарения и обеспечивается эффект гашения пламени.

2. Установлено, что пеностекло является одним из самых легких, термостойких, влагостойких и наименее теплопроводных материалов, что позволяет использовать его в качестве СГП, способного держаться на поверхности углеводородных жидкостей, образуя устойчивый изолирующий слой.

3. Проведенная оценка геометрических параметров СГП (гранулометрический состав, высота слоя, пористость слоя, насыпная плотность гранул) позволила разработать модель определения высоты «сухого» СГП в условиях равновесного состояния с учетом капиллярного подъема уровня жидкости. Полученные расчетные и экспериментальные зависимости высоты «сухого» СГП от плотности жидкости имеют высокую сходимость.

4. Разработана математическая модель скорости испарения углеводородных жидкостей с экранирующим слоем гранулированного пеностекла. Теоретически и экспериментально обоснован выбор фракции пеностекла 5-7 мм, обеспечивающий максимальный экранирующий эффект, при котором минимальная общая высота СГП способствует наибольшему снижению параметров испарения углеводородных жидкостей.

5. Разработана математическая модель расчета критической высоты «сухого» СГП, обеспечивающего гашение пламени в зависимости от физико-химических свойств углеводородных жидкостей различных классов, физических свойств СГП, а также площади покрытия пролива.

6. Получены зависимости критической удельной массовой скорости выгорания от свойств жидкости, свойств СГП, временного показателя градиента давления и зависимости критической высоты «сухого» СГП от интенсивности испарения жидкостей при условии  $H_c = H_{кр}$  для поддонов площадью до 2,5 м<sup>2</sup>.

7. Разработана методика определения критической высоты «сухого» СГП, при которой достигается эффект гашения пламени, а также лабораторная установка для оценки параметров испарения и гашения пламени через СГП.

8. Разработаны методика и экспериментальная установка по определению геометрических параметров слоя гранулированного пеностекла, обеспечивающего гашение пламени горючих жидкостей в поддонах для сбора локальных проливов горючих жидкостей и даны рекомендации по применению данных поддонов.

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

1. Ширяев, Е.В. Статистический анализ пожаров на объектах с обращением нефтепродуктов [Электронный ресурс] / Е.В. Ширяев [и др.] // Технологии техносферной безопасности. – 2014. – №3 (55). – 8 с. Режим доступа: <http://agps-2006.narod.ru/ttb/2014-3/33-03-14.ttb.pdf>.

2. Ширяев, Е.В. Огнезащитный эффект гранулированной пеностекляной подложки при углеводородном пожаре пролива [Текст] / Е.В. Ширяев [и др.] // Безопасность жизнедеятельности. – 2016. – №4. – С. 33-38.

3. Ширяев, Е.В. Влияние гранулированной подложки на процесс горения нефтепродукта при его аварийном проливе. [Электронный ресурс] / Е.В. Ширяев, В.П. Назаров // Технологии техносферной безопасности. – 2017. – №3 (73). – 8 с. Режим доступа: <http://agps-2006.narod.ru/ttb/2017-3/02-03-17.ttb.pdf>.

4. Ширяев, Е.В. Нормативно-правовые основы и опыт применения инженерно-технических решений, направленных на снижение пожарной опасности аварийных проливов горючих жидкостей [Текст] / Е.В. Ширяев, В.А. Комельков // Современные проблемы гражданской защиты. – 2018. – №3. – С. 82-87.

5. Ширяев, Е.В. Оценка эффективности пламегашения пролива ЛВЖ в гранулированном слое подложки [Текст] / Е.В. Ширяев // Современные проблемы гражданской защиты. – 2019. – №3. – С. 89-96.

6. Ширяев, Е.В. Исследование параметров подложки гранулированного пеностекла, влияющих на снижение интенсивности испарения горючих жидкостей [Текст] / Е.В. Ширяев // Современные проблемы гражданской защиты. – 2019. – №4. – С. 19-27.

### **Остальные публикации по теме диссертации:**

7. Ширяев, Е. В. Снижение термических и геометрических параметров пламени при горении нефтепродуктов на основе применения гранулированных подложек [Текст] / Е.В. Ширяев [и др.] // Проблемы техносферной безопасности – 2015: Материалы IV Международной научно-практической конференции молодых ученых и специалистов. – М.: Академия ГПС МЧС России, 2015. – С. 159-164.

8. Ширяев, Е.В. Превентивная защита фланцевых соединений от теплового излучения углеводородного пожара пролива подложками из пеностекла [Текст] / Е.В. Ширяев // Проблемы техносферной безопасности – 2016: Материалы V-й Международной научно-практической конференции молодых ученых и специалистов. – М.: Академия ГПС МЧС России, 2016. – С. 94-100.

9. Ширяев, Е.В. Аналитический обзор технических решений в области снижения пожарной опасности локальных аварийных проливов горючих жидкостей [Текст] / Е.В. Ширяев // Предотвращение. Спасение. Помощь: Материалы XXVIII Международной научно-практической конференции. – Химки: Академия гражданской защиты МЧС России, 2018. – С. 80-85.

10. Ширяев, Е.В. Горение н-гексана на пределе гашения пламени в емкости с пористой средой [Текст] / Е.В. Ширяев // Современные пожаробезопасные материалы и технологии: Сборник материалов IV Международной научно-практической конференции. – Иваново: ИПСА ГПС МЧС России, 2020. – С. 125-128.

11. Ширяев, Е.В. Влияние гранулированного пеностекла «Термоизол» на параметры испарения и горения легковоспламеняющихся жидкостей [Текст] / Е.В. Ширяев // Пожарная безопасность: современные вызовы. Проблемы и пути решения: Материалы Международной научно-практической конференции Санкт-Петербург, 14 апреля 2020 года. – СПб.: ФГБОУ ВО Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, 2020. – Т.1. – С. 115-118.

12. Ширяев, Е.В. Экранирование испарения пролива легковоспламеняющихся жидкостей гранулированной подложкой из пеностекла [Электронный ресурс] / Е.В. Ширяев // Проблемы техносферной безопасности – 2020: Сборник материалов IX Международной научно-практической конференции молодых ученых и специалистов, Академия ГПС МЧС России, Москва, 7–8 апреля 2020. – Режим доступа: <https://www.sci-space.com/publication/1217/text>.

13. Ширяев, Е.В. Способы снижения пожарной опасности на участках локальных проливов горючих жидкостей [Текст] / Е.В. Ширяев, М.Г. Шведов // Актуальные вопросы совершенствования инженерных систем обеспечения пожарной безопасности объектов: Материалы VIII Всероссийской научно-практической конференции, Иваново, 20 апреля 2021 г. – Иваново: ИПСА ГПС МЧС России, 2021. – С. 413–415.

Подписано в печать 16.12.2021. Формат 60x84/1/16.

Печать офсетная. Усл. печ. л. 1,0. Тираж 100 экз. Заказ № 402.

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