

**МИНИСТЕРСТВО РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ПО ДЕЛАМ ГРАЖДАНСКОЙ ОБОРОНЫ, ЧРЕЗВЫЧАЙНЫМ СИТУАЦИЯМ
И ЛИКВИДАЦИИ ПОСЛЕДСТВИЙ СТИХИЙНЫХ БЕДСТВИЙ**

Академия Государственной противопожарной службы МЧС России

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)

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Научный руководитель:

Заслуженный работник высшей
школы Российской Федерации,
доктор технических наук, профессор
Назаров Владимир Петрович

Москва – 2021

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	6
ГЛАВА 1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА ПОЖАРНОЙ ОПАСНОСТИ ЛОКАЛЬНЫХ ПРОЛИВОВ УГЛЕВОДОРОДНЫХ ЖИДКОСТЕЙ.....	13
1.1 Анализ статистических данных по пожарам на объектах с обращением углеводородных жидкостей.....	13
1.2 Пожарная опасность локальных аварийных проливов углеводородных жидкостей.....	16
1.3 Анализ способов и технических решений, направленных на снижение пожарной опасности аварийных проливов углеводородных жидкостей.....	29
1.3.1 Нормативно-правовые основы применения технических устройств, ограничивающих растекание углеводородных жидкостей.....	30
1.3.2 Анализ исследований в области пассивного гашения пламени углеводородных жидкостей в вертикальных каналах	32
1.3.3 Анализ исследований в области снижения пожарной опасности проливов углеводородных жидкостей с применением гранулированных материалов.....	36
1.4 Анализ свойств гранулированных материалов.....	43
1.5 Выводы по первой главе.....	47
ГЛАВА 2 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ИСПАРЕНИЯ УГЛЕВОДОРОДНЫХ ЖИДКОСТЕЙ И ГАШЕНИЯ ПЛАМЕНИ В УСЛОВИЯХ ЭКРАНИРОВАНИЯ ПРОЛИВА СЛОЕМ ГРАНУЛИРОВАННОГО ПЕНОСТЕКЛА	49
2.1 Влияние слоя гранулированного пеностекла на диффузионное горение углеводородных жидкостей.....	49
2.2 Условия гашения пламени при экранировании пролива углеводородных жидкостей слоем гранулированного пеностекла	53

2.2.1 Условия нарушения теплового баланса поддержания горения	53
2.2.2 Условия нарушения временного баланса поддержания горения	56
2.3 Параметры фильтрации, влияющие на движение пара углеводородных жидкостей через слой гранулированного пеностекла.....	59
2.4 Разработка математической модели расчета критической высоты «сухого» слоя гранулированного пеностекла на поверхности пролива углеводородных жидкостей, обеспечивающей гашение пламени	62
2.4.1 Модель пористой фильтрации по закону Дарси.....	62
2.4.2 Закон фильтрации Форхгеймера.....	64
2.4.3 Уравнение Бринкмана при движении пара в пристеночной области ...	65
2.4.4 Математическая модель расчета критической высоты «сухого» слоя гранулированного пеностекла на поверхности пролива углеводородных жидкостей, обеспечивающей гашение пламени	67
2.5 Оценка геометрических параметров слоя гранулированного пеностекла	69
2.6 Оценка равновесной высоты слоя гранулированного пеностекла	80
2.7 Оценка смачиваемости и капиллярного поднятия при проливах углеводородных жидкостей на гранулированный слой пеностекла.....	82
2.8 Модель испарения углеводородных жидкостей при экранировании поверхности пролива гранулированным слоем пеностекла.....	88
ГЛАВА 3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ	
ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭКРАНИРОВАНИЯ ИСПАРЕНИЯ И ГОРЕНИЯ	
ЖИДКОСТЕЙ ГРАНУЛИРОВАННЫМ СЛОЕМ ПЕНОСТЕКЛА	
3.1 Граничные условия проведения эксперимента.....	95
3.2 Лабораторные исследования параметров испарения углеводородных жидкостей	97
3.2.1 Экспериментальная оценка интенсивности испарения бензина АИ-92 через слой гранулированного пеностекла различных фракций	98
3.2.2 Оценка параметров фильтрации, влияющих на движение паров бензина АИ-92 через слой гранулированного пеностекла.....	102

3.2.3 Экспериментальная оценка параметров испарения углеводородных жидкостей через слой гранулированного пеностекла фракции Ф5-7 мм.....	104
3.2.4 Оценка высоты зоны, ограниченной нижним концентрационным пределом распространения пламени паров по результатам лабораторного эксперимента.....	108
3.3 Лабораторные исследования параметров гашения пламени углеводородных жидкостей экранирующим слоем гранулированного пеностекла	111
3.3.1 Экспериментальная оценка критической высоты слоя гранулированного пеностекла, при котором происходит гашение пламени	113
3.3.2 Экспериментальная оценка высоты пламени и распределения температур в слое гранулированного пеностекла.....	118
3.3.3 Экспериментальная оценка скорости горения на пределе гашения пламени углеводородных жидкостей при экранировании слоем гранулированного пеностекла.....	122
3.4 Результаты полигонных испытаний и их обсуждение с результатами лабораторных экспериментов	125
3.4.1 Анализ экспериментальных данных критической высоты «сухого» слоя гранулированного пеностекла.....	131
3.4.2 Анализ экспериментальных данных критической скорости выгорания и испарения углеводородных жидкостей.....	137
3.5 Методика определения геометрических параметров слоя гранулированного пеностекла, обеспечивающего гашение пламени углеводородных жидкостей в поддонах для сбора локальных проливов, и рекомендации по их применению	140
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	144
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	146
ПРИЛОЖЕНИЕ А Результаты оценки массы паров углеводородных жидкостей при экранировании поверхности испарения слоем гранул пеностекла разных фракций.....	161

ПРИЛОЖЕНИЕ Б Результаты оценки интенсивности испарения углеводородных жидкостей при экранировании поверхности испарения слоем гранулированного пеностекла фракции 5-7 мм.....	163
ПРИЛОЖЕНИЕ В Результаты оценки высоты зоны, ограниченной нижним концентрационным пределом распространения пламени паров при экранировании поверхности углеводородной жидкости слоем гранулированного пеностекла.....	167
ПРИЛОЖЕНИЕ Г Результаты оценки времени сгорания паров легковоспламеняющихся жидкостей при экранировании поверхности испарения слоем гранулированного пеностекла.....	168
ПРИЛОЖЕНИЕ Д Оценка погрешности результатов измерений критической высоты «сухого» слоя гранулированного пеностекла.....	170
ПРИЛОЖЕНИЕ Е Результаты расчета времени «перепада давления», общей и критической высоты «сухого» слоя гранулированного пеностекла. Результаты эксперимента и их обработка.	173
ПРИЛОЖЕНИЕ Ж Результаты экспериментальных значений критической высоты «сухого» слоя гранулированного пеностекла, параметров испарения и горения углеводородных жидкостей с экраном в виде слоя гранулированного пеностекла.....	176
ПРИЛОЖЕНИЕ З Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ и акты внедрения.....	178

ВВЕДЕНИЕ

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 [1-7].

Ограничение распространения пожара за пределы очага регламентируется ст. 59 Федерального закона «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности» [12]. Одним из наиболее простых и, достаточно, эффективных способов снижения пожарной опасности локальных проливов горючих жидкостей является применение поддонов с гранулированным наполнителем [39-41]. 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 кг/м^3 , а также легкие гранулированные материалы, в виде керамзита, пеностекла, вермикулита и т.п. [39-41]. 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 существует 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 (СПП), 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 СПП 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 СПП.

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. [27, 30, 32-37, 42, 103, 104].

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. [39, 40, 43, 85, 86, 90, 105-107].

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 м².

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.

ГЛАВА 1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА ПОЖАРНОЙ ОПАСНОСТИ ЛОКАЛЬНЫХ ПРОЛИВОВ УГЛЕВОДОРОДНЫХ ЖИДКОСТЕЙ

1.1 Анализ статистических данных по пожарам на объектах с обращением углеводородных жидкостей

Аварийные ситуации, связанные с проливами углеводородных жидкостей на объектах нефтегазовой отрасли, пожаровзрывоопасны и даже незначительные локальные утечки легковоспламеняющихся жидкостей представляют угрозу воспламенения паров и последующего развития (эскалации) пожара [4-7].

На основании статистических данных по авариям и пожарам на объектах хранения, переработки ЛВЖ и ГЖ в Российской Федерации, полученным из источников Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору, а также ФГБУ ВНИИПО МЧС России, был проведен анализ [1-7]. За период с 2009 по 2018 гг. на объектах хранения, переработки ЛВЖ и ГЖ в Российской Федерации произошло 1233 пожара с аварийными выбросами (проливами) углеводородных жидкостей, распределение количества пожаров представлено в Таблице 1.1.

Таблица 1.1. – Количество пожаров в Российской Федерации на объектах хранения, переработки ЛВЖ и ГЖ за период с 2009 по 2018 гг.

Объект пожара	2009 г.		2010 г.		2011 г.		2012 г.		2013 г.	
	ед.	%	ед.	%	ед.	%	ед.	%	ед.	%
Здание насосной с обращением ЛВЖ, ГЖ	56,0	36,1	36,0	31,6	37,0	27,8	46,0	37,1	39,0	37,5
Здание склада ЛВЖ, ГЖ в таре	18,0	11,6	15,0	13,2	22,0	16,5	14,0	11,3	10,0	9,6
Склад хранения ЛВЖ, ГЖ	40,0	25,8	34,0	29,8	41,0	30,8	32,0	25,8	23,0	22,1

<i>Окончание таблицы 1.1</i>											
Объект пожара	2009 г.		2010 г.		2011 г.		2012 г.		2013 г.		
	ед.	%	ед.	%	ед.	%	ед.	%	ед.	%	
Наружная установка	29,0	18,7	25,0	21,9	29,0	21,8	24,0	19,4	26,0	25,0	
Сливо-наливные эстакады	12,0	7,7	4,0	3,5	4,0	3,0	8,0	6,5	6,0	5,8	
Итого	155	100	114	100	133	100	124	100	104	100	
Объект пожара	2014 г.		2015 г.		2016 г.		2017 г.		2018 г.		Итого
	ед.	%	ед.	%	ед.	%	ед.	%	ед.	%	
Здание насосной с обращением ЛВЖ, ГЖ	53,0	39,8	44,0	38,3	35,0	32,1	40,0	30,5	42,0	36,5	428
Здание склада ЛВЖ, ГЖ в таре	23,0	17,3	14,0	12,2	14,0	12,8	21,0	16,0	19,0	16,5	170
Склад хранения ЛВЖ, ГЖ	32,0	24,1	37,0	32,2	40,0	36,7	39,0	29,8	31,0	27,0	349
Наружная установка	23,0	17,3	16,0	13,9	16,0	14,7	25,0	19,1	18,0	15,7	231
Сливо-наливные эстакады	2,0	1,5	4,0	3,5	4,0	3,7	6,0	4,6	5,0	4,3	55
Итого	133	100	115	100	109	100	131	100	115	100	1233

В зданиях и на наружных технологических установках с обращением углеводородных жидкостей количество пожаров за отчетный период распределилось, примерно, поровну. Распределение количества травмированных и погибших на пожарах, связанных с аварийными проливами горючих жидкостей на объектах хранения, переработки ЛВЖ и ГЖ, представлены на Рисунке 1.1.

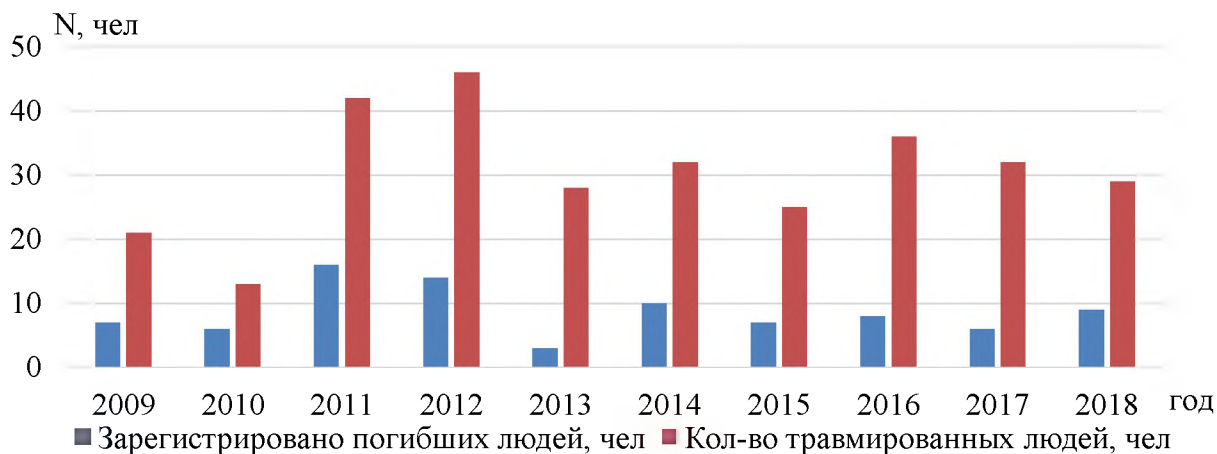


Рисунок 1.1 – Распределение количества травмированных и погибших на пожарах с аварийными проливами ЛВЖ, ГЖ за период с 2009 по 2018 гг.

Результаты анализа показывают, что пожары пролива занимают первое место среди сценариев развития пожара (38 %), Рисунок 1.2.



Рисунок 1.2 – Распределение пожаров на объектах нефтегазовой отрасли по сценариям их развития

Диаграмма по причинам возникновения пожара с аварийным выбросом и розливом ЛВЖ, ГЖ на предприятиях нефтегазовой отрасли в период 2009-2018 гг. представлена на Рисунке 1.3.

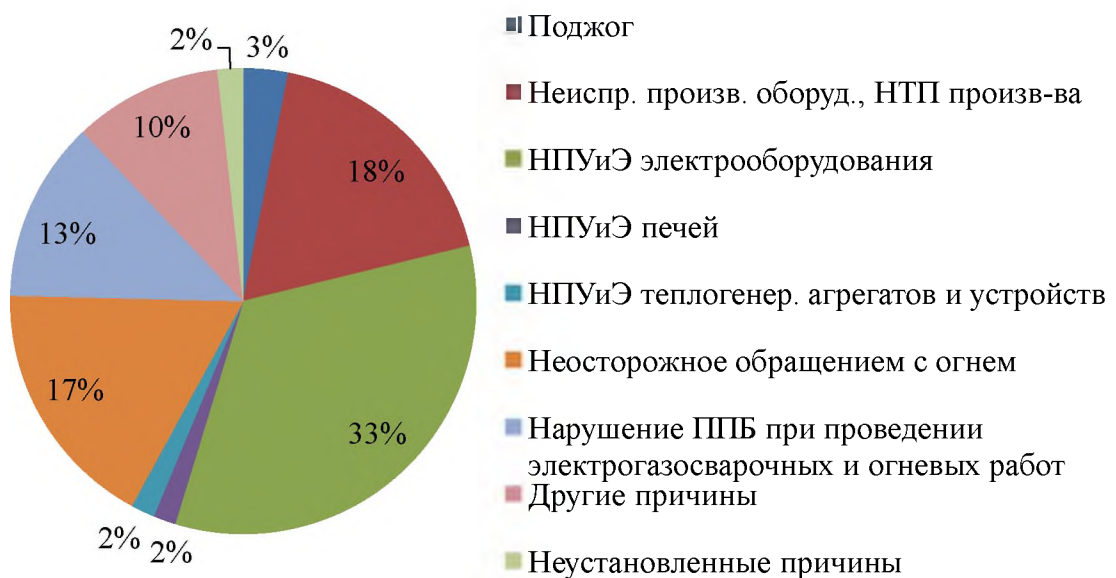


Рисунок 1.3 – Причины возникновения пожара с аварийным выбросом и розливом ЛВЖ, ГЖ

Из анализа статистики аварийных ситуаций по видам технологического оборудования на объектах нефтепереработки и нефтехимии за период 2007-

2016 г. около половины аварий происходит по причине разгерметизации насосов и технологических трубопроводов, Таблица 1.2 [6].

Таблица 1.2 Статистика аварий по видам технологического оборудования

№п/п	Оборудование	Количество аварий, %
1	Технологические трубопроводы	31,2
2	Насосы	18,9
3	Емкости (сепараторы, реакторы и т.п.)	15,0
4	Технологические печи	11,4
5	Колонные аппараты	11,2
6	Резервуары и резервуарные парки	3,8
7	Прочее оборудование	8,5

Ежегодный анализ аварий на предприятиях нефтегазового комплекса [4, 10, 84] показывает, что аварии, связанные с аварийными проливами ЛВЖ, ГЖ протекают в сложных условиях, характеризуются быстрым распространением огня на смежные участки технологического оборудования и могут принимать эскалационный характер развития аварии.

1.2 Пожарная опасность локальных аварийных проливов углеводородных жидкостей

Пожарная опасность локальных проливов углеводородных жидкостей на объектах нефтегазовой отрасли обусловлена следующими факторами:

- повышенной взрывопожароопасностью веществ (преимущественно ЛВЖ, ГЖ), обращающихся в производстве;
- размещением аппаратов, емкостей, трубопроводов с взрывопожароопасными технологическими средами близко друг к другу и/или сообщающихся между собой;
- эксплуатацией технологического оборудования с углеводородными жидкостями под избыточным давлением;
- возможностью образования горючей среды как внутри, так и снаружи технологического оборудования;

- возможностью образования источников зажигания;
- взаимосвязанностью путей распространения пожара.

Схема развития аварии, связанная с локальными проливами ЛВЖ, ГЖ, представлена на Рисунке 1.4.

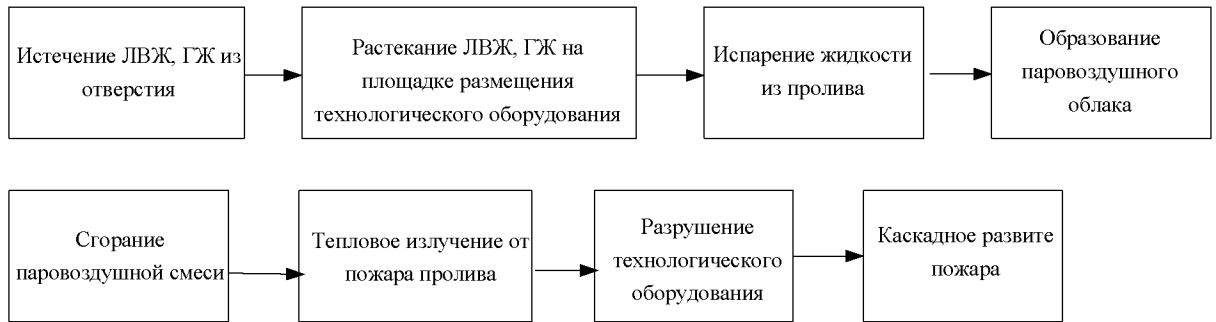


Рисунок 1.4 – Схема развития аварии, связанной с локальным проливом ЛВЖ, ГЖ

Аналитический обзор пожаров, связанных с локальными аварийными проливами ЛВЖ, ГЖ на объектах нефтегазовой отрасли, по материалам [4, 84] приведен в Таблице 1.3.

Таблица 1.3 – Аналитический обзор пожаров, связанных с локальными аварийными проливами ЛВЖ, ГЖ на объектах нефтегазовой отрасли

№	Объект и дата аварии	Краткое описание аварии	Технические причины аварии	Последствия аварии
1	Участок налива и слива нефтепродуктов товарно-сырьевого цеха 21.05.2014	При выполнении огневых ремонтных работ по монтажу нестандартного фланцевого соединения на участке технологического трубопровода произошло возгорание паров нефтепродукта с последующим распространением пожара внутрь помещения насосной светлых нефтепродуктов [4].	Попадание искры в зону разгерметизации участка технологического трубопровода, выведенного в ремонт без отключения от действующего технологического оборудования. Применение не проектного фланцевого соединения [4].	Повреждено технологическое оборудование, силовые электрокабели. Смертельно травмирован электрогазосварщик. Экономический ущерб составил 5 050 000 руб [4].

Продолжение таблицы 1.3

№	Объект и дата аварии	Краткое описание аварии	Технические причины аварии	Последствия аварии
2	Площадка склада по хранению и перевалке нефтепродуктов ЗАО «Коцит» 29.03.2014	Во время слива нефраса из ж/д цистерны в автоцистерну, производимого открытым способом, вне специально устроенных сливно-наливных пунктов, произошла вспышка горючих паров нефраса при аварийном проливе [4].	Возникновение опасных искровых разрядов вследствие накопления на теле оператора склада нефтепродуктов зарядов статического электричества, путем использования антиэлектростатических СИЗ. Место слива-налива не оборудовано устройствами автоматического контроля заземления с искробезопасным контактным устройством [4].	Оператор склада нефтепродуктов получил термические ожоги. Сгорела автоцистерна. Экономический ущерб 29 тыс руб. [4].
3	Площадка нефтебазы ООО «Волжские инфраструктурные системы» 25.08.2014	Во время слива светлого нефтепродукта из автоцистерны в РГС произошел срыв сливного рукава с разливом продукта и последующим его воспламенением. [4].	Срыв шланга с патрубка в результате наличия не снятой заглушки, установленной на запорной арматуре, что привело к разливу продукта и его возгоранию от возникшего статического электричества. Применение насосного агрегата, не предусмотренного проектом. [4].	Повреждены автоцистерна, передвижной насосный агрегат, резиновый рукав. Два человека получили термические ожоги, от которых один скончался. Экономический ущерб составил 11 тыс. руб. [4].
4	Установка замедленного коксования АО «Газпромнефть-Омский НПЗ» 15.09.2016	Пролив и воспламенение продукта на технологическом трубопроводе перекачки бензина [4].	Механическое повреждение технологического трубопровода при проведении ремонтных работ [4].	Экономический ущерб 16 770 000 руб. [4].
5	Установка «Пиролиз-1» ООО «Газпром нефтехим Салават» 23.12.2016	На участке трубопровода бензина от эстакады к печи произошла утечка продукта с последующим ее воспламенением [4].	Разгерметизация участка трубопровода в результате его размораживания. Неисправность обратного клапана на технологическом трубопроводе [4].	Один человек пострадал. Экономический ущерб 194 013,35 руб [4].

Продолжение таблицы 1.3

№	Объект и дата аварии	Краткое описание аварии	Технические причины аварии	Последствия аварии
6	Площадка слива сырья и налива нефтепродуктов ООО «Оазис Лтд» 26.11.2016	При сливе нефти из автоцистерны в заглубленную емкость произошел срыв сливного рукава и разлив нефтепродукта из автоцистерны [4].	Отсутствие герметичности системы слива сырья: присоединение сливного шланга осуществлялось с помощью хомута [4].	Экономический ущерб 1 000 052 тыс руб. [4].
7	Установка замедленного коксования ПАО «Газпром», 15.09.2016	При проведении работ по замене термопары на технологическом трубопроводе перекачки бензина, произошел отрыв резьбового соединения термокармана из «бобышки» трубопровода, вследствие чего произошла разгерметизация технологической линии с выбросом продукта и пожаром [4].	Внешнее механическое воздействие на соединение между бобышкой технологического трубопровода при выкручивании термопары из термокармана [4].	Повреждены силовые кабели, кабели КИПиА, кабельные эстакады, площадка обслуживания теплообменников Экономический ущерб составил 16 770 000 руб. [4].
8	Площадка производства синтетического каучука и нефтеполимерных смол ПАО «Нижекамскнефтехим» 20.05.2016	При проведении ремонтных работ, из спускника вновь смонтированного участка трубопровода произошла утечка изопентан-изопреновой фракции с последующим ее воспламенением [4].	Необеспечение герметичности арматуры на смонтированном участке трубопровода в нижней части емкости Наличие источников зажигания внутри каре емкостного парка (не произведено отключение сварочного поста), приведшего к возгоранию горючей среды [4].	Повреждены эстакада, строительные конструкции, оборудование. Смертельно пострадали 2 человека из числа производственного персонала [4].
9	Площадка производства изопренового каучука ОАО «Синтез-Каучук» 28.04.2016	На наружной установке отделения очистки изопрена при проведении ремонтных работ (снятие заглушки из фланца арматуры Ду 100 мм) на трубопроводе слива изопрена из дефлегматора в емкость произошла утечка продукта с последующим возгоранием [4].	При проведении ремонтных работ участок трубопровода не был полностью освобожден от среды, не продут азотом. Возгорание произошло от искрообразования в результате падения заглушки фланцевого соединения на площадку [4].	Пострадали 3 человека из числа производственного персонала [4].

Продолжение таблицы 1.3

№	Объект и дата аварии	Краткое описание аварии	Технические причины аварии	Последствия аварии
10	Товарно-сырьевой цех ООО «РН-Комсомольский НПЗ» 13.01.2016	На блоке подачи присадок в гидроочищенное дизельное топливо участка приготовления товарной продукции произошел пролив нефтепродукта на площади 10 м ² и воспламенение [4].	Разгерметизация трубопровода после проведения ремонтных работ на участке с отверстием закрытым не регламентируемым способом, через которое произошла утечка присадки, ее попадание на трубопровод пароспутник» с самовоспламенением [4].	Поврежден технологический трубопровод, оказавшийся в зоне теплового воздействия [4].
11	Участок подготовки нефти ООО «Густореченское» 14.06.2017	При проведении монтажных работ произошел розлив нефти с последующим возгоранием на площадке горизонтальных резервуаров [4].	Проведение ремонтных работ без обязательных мероприятий по их подготовке и безопасному проведению [4].	Экономический ущерб от аварии составил 92,7 тыс. руб [4].
12	Цех приготовления триизобутилалюминия ПАО «Нижекамскнефтехим» 17.06.2018	При проведении пожароопасных работ по установке заглушки на емкости для приема гексанового растворителя (нефраса) произошел выход остатков продукта через разъем фланцевого соединения с последующим воспламенением [4].	Воспламенение продукта произошло в результате возникновения зарядов статистического электричества от струи гексанового растворителя в металлической емкости и перемешивании с остатками алюминиевого порошка, в емкости [4].	Пострадали 2 сотрудника из числа производственного персонала [4].
13	Площадка цеха по переработке абсорбентов ООО ПКП «ТИРА-ЛПС» 13.11.2019	В период остановки технологического процесса для проведения работ по удалению остатка получаемого продукта из испарителя и его последующей очистки произошла разгерметизация фланцевого соединения участка технологического трубопровода с последующим воспламенением истекаемого продукта и развитием пожара [4].	Причиной разгерметизации участка фланцевого соединения технологического трубопровода явилось отсутствие компенсации температурных деформаций, приведшее к натяжению трубопровода и нарушению соосности уплотнительных поверхностей фланцев. Причиной возгорания истекаемого продукта явилось короткое замыкание токоведущих жил электрического силового кабеля [4].	Повреждены и частично разрушены элементы строительных конструкций здания цеха по переработке абсорбентов, технологическое оборудование и электрооборудование. Экономический ущерб 480 000 руб. [4].

Окончание таблицы 1.3

№	Объект и дата аварии	Краткое описание аварии	Технические причины аварии	Последствия аварии
14	Установка переработки фракции С5 пиролиза бензина 25.10.2019	Во время регламентного ведения технологического процесса на узле очистки фракции С5 пиролиза бензина от циклопентадиена произошла разгерметизация отборного устройства давления, установленного на линии нагнетания насоса, предназначенного для подачи фракции С5 из емкости в реактор, с последующим воспламенением истекаемого продукта и развитием пожара в насосном отделении [4].	Причиной разгерметизации отборного устройства давления, явилось раскручивание слабо затянутого его резьбового соединения в результате воздействия на манометрическую сборку повышенной вибрации от насоса из-за деформации вала насоса. Причиной возгорания стала фрикционная искра от соударения металлических элементов вала насоса о защитные элементы муфтового соединения [4].	Повреждено насосное оборудование, линии подачи и нагнетания насосного оборудования, электрооборудование насосной, средства измерения и автоматизации [4].

Фотографии последствий пожаров, связанных с аварийными проливами углеводородных жидкостей (позиции 3, 11 и 14 Таблицы 1.3) приведены на Рисунках 1.5-1.7.



Рисунок 1.5 – Пожар на площадке слива нефтебазы ООО «Волжские инфраструктурные системы» 25.08.2014



Рисунок 1.6 – Пожар на УПН ООО «Густореченское» 14.06.2017



Рисунок 1.7 – Пожар на установке переработки фракции С5 пиролиза бензина
25.10.2019

Постоянные утечки углеводородных жидкостей встречаются на следующих участках технологических систем объектов хранения, переработки ЛВЖ, ГЖ:

- под сливными патрубками цистерн на железнодорожных и автомобильных сливо-наливных эстакадах (СНЭ);
- в местах отбора проб углеводородных жидкостей из аппаратов;
- в местах разъемных соединений и запорной арматуры трубопроводов;
- в местах размещения насосного оборудования и соединений технологических трубопроводов.

Перечисленные источники утечек делятся на: утечки первой степени – при нормальном режиме работы, второй степени – в остальных случаях [11]. До устранения причин появления утечек углеводородных жидкостей используют различные поддоны, которые могут быть пластиковыми, металлическими, различной конфигурации и объема. Стандартов в отношении поддонов для сбора локальных проливов углеводородных жидкостей в России не предусмотрено.

Характерными ОФП при воспламенении аварийных проливов углеводородных жидкостей являются: тепловое излучение пожара пролива; избыточное давление при сгорании паровоздушной смеси в помещении; сгорание паровоздушного облака (пожар-вспышка) в открытом пространстве.

Утечки углеводородных жидкостей происходят во время проведения сливо-наливных операций на железнодорожных и автомобильных эстакадах, как правило, после проведения операции слива, при отсоединении устройства слива налива (далее – УСН) от сливного патрубка цистерны, Рисунки 1.8, 1.9.

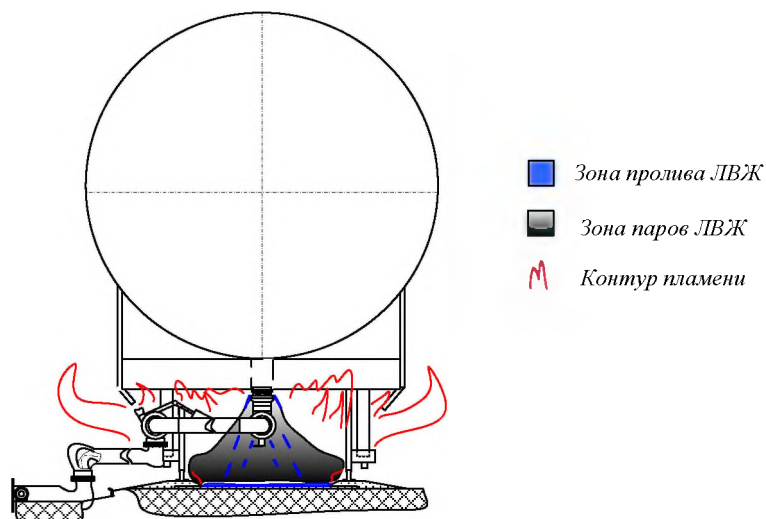


Рисунок 1.8 – Границы зон критериев пожарной опасности на участке железнодорожной сливноналивной эстакады



Рисунок 1.9 – Место локальных утечек нефтепродуктов на железнодорожной сливно-наливной эстакаде

Утечки углеводородных жидкостей возможны из-за нарушения герметичности запорной арматуры пробоотборников технологических аппаратов (резервуаров). При этом для сбора локальных утечек ЛВЖ, ГЖ на объектах нефтегазовой отрасли используют поддоны-приемники, Рисунки 1.10, 1.11.

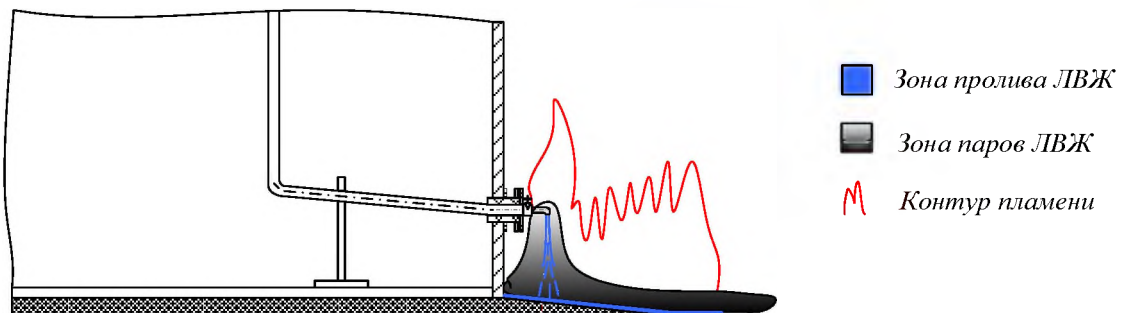


Рисунок 1.10 – Границы зон критериев пожарной опасности на участке пробоотборников РВС с ЛВЖ



Рисунок 1.11 – Отбор пробы нефтепродукта на PVS

Наиболее вероятными местами образования локальной разгерметизации технологического оборудования являются разъёмные (фланцевые) соединения. При нарушении герметичности фланцевых соединений, а также при подготовке к проведению ремонтных работ на технологических трубопроводах возможны аварийные проливы углеводородных жидкостей, Рисунки 1.12, 1.13.

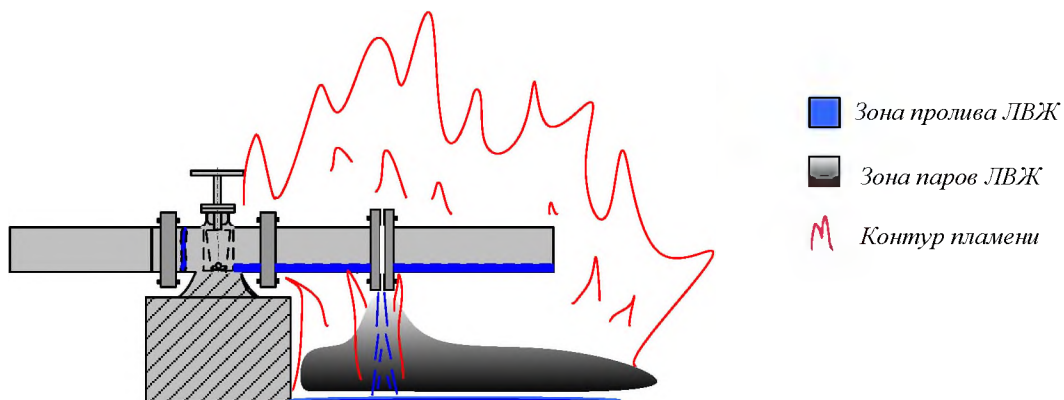


Рисунок 1.12 – Границы зон критериев пожарной опасности на участках продуктопроводов ЛВЖ, ГЖ



Рисунок 1.13 – Участок нефтепродуктопроводов с запорной арматурой

На технологических участках насосного оборудования для перекачки ЛВЖ, ГЖ из-за повышенных вибраций нарушается герметичность фланцевых соединений примыкающих технологических трубопроводов, вследствие чего, образуются локальные проливы транспортируемых жидкостей, Рисунки 1.14, 1.15.

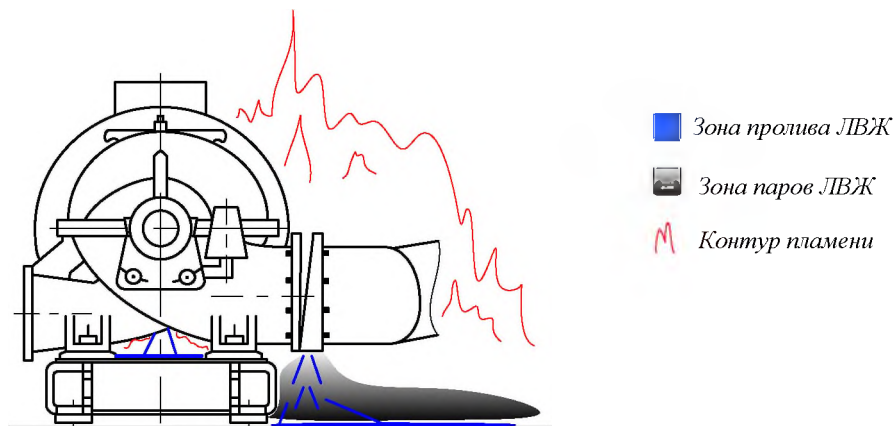


Рисунок 1.14 – Границы зон критериев пожарной опасности на участке размещения насоса для перекачки ЛВЖ



Рисунок 1.15 – Капельная утечка бензина через фланцевое соединение и ее сбор в пластиковую канистру

При аварийном выходе легковоспламеняющихся жидкостей горячая среда образуется при условии

$$t_p \geq t_{всп} \quad (1.1)$$

где t_p – температура расчетная, °С,

$t_{всп}$ – температура вспышки °С.

$$t_p = \frac{t_a + t_{oc}}{2} \quad (1.2)$$

где t_p – температура вещества (горючей жидкости), °С,

$t_{всп}$ – температура окружающей среды °С.

Наиболее вероятными источниками зажигания при локальных проливах нефтепродуктов являются:

- проявление зарядов статического электричества при падении струи горючей жидкости;
- проявление зарядов статического электричества при контакте ЛВЖ, ГЖ с пластиковой приемной емкостью (канистрой);
- возникновение искровых разрядов вследствие накопления на теле или одежде технического персонала зарядов статического электричества;
- образование фрикционных искр при срыве соединительной головки сливного шланга и соударении ее с твердой неискробезопасной поверхностью;

- образование фрикционных искр при выполнении ремонтных работ неискробезопасным инструментом;
- открытый огонь (пламя, искры) при проведении огневых ремонтных работ.

При воспламенении локального пролива ЛВЖ, ГЖ пламя распространяется по паровоздушной смеси и поверхности пролива горючей жидкости. Условиями, способствующими быстрому распространению пожара, являются:

- расположение в непосредственной близости от горящего пролива технологического оборудования с горючими жидкостями;
- отсутствие ограничений растекания жидкости;
- несвоевременное применение подручных средств пожаротушения и отсутствие автоматических систем пожаротушения.

Наибольшее количество аварийных проливов нефтепродуктов происходит на технологическом оборудовании, находящемся под давлением. В методике [13] приведены частоты реализации инициирующих пожароопасные ситуации событий для некоторых типов оборудования объектов и частоты утечек из технологических трубопроводов, Рисунок 1.16.

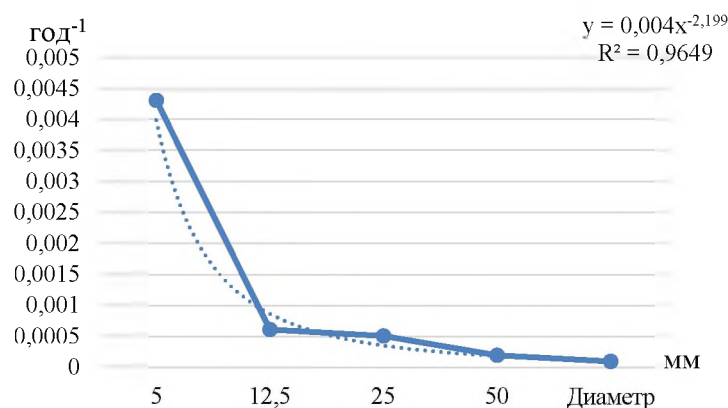


Рисунок 1.16 – Распределение частот разгерметизации технологических трубопроводов по диаметру отверстия

Вероятность образования малых отверстий (<12,5 мм) технологических трубопроводов гораздо выше, чем больших или разрыва [101].

Локальные проливы нефтепродуктов пожаровзрывоопасны и занимают первое место по сценариям развития пожара. Высокий процент изношенного технологического оборудования позволяет сделать вывод о росте ремонтных работ на технологическом оборудовании. Исходя из данных по частотам разгерметизации трубопроводов, масштабность проблемы локальных проливов ЛВЖ и ГЖ достаточно велика. Распределение пожаров на объектах с обращением нефтепродуктов показывает, что наибольшее их количество происходит при производстве ремонтных работ на складах ЛВЖ, ГЖ (нефтебазах), а также в зданиях насосных по перекачке ЛВЖ, ГЖ [101].

Таким образом, высокая пожарная опасность и высокая вероятность локальных аварийных проливов ЛВЖ и ГЖ, риск гибели, травматизма рабочего персонала, а также отсутствие стандартов к поддонам для сбора утечек углеводородных жидкостей указывают на необходимость совершенствования и необходимость поиска новых технологий, направленных на ограничение распространения пожара, а также снижения опасных факторов пожара пролива.

1.3 Анализ способов и технических решений, направленных на снижение пожарной опасности аварийных проливов углеводородных жидкостей

Ограничение распространения пожара за пределы очага регламентируется ст. 59 Федерального закона «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности» [12]. Снижение пожарной опасности локальных проливов углеводородных жидкостей может быть достигнуто за счет применения технических решений, ограничивающих разлив и растекание жидкости при пожаре, при этом предотвращающих развитие пожара за счет уменьшения характеристик пламени вплоть до полного его затухания [102].

В настоящее время существует несколько подходов к повышению уровня пожарной безопасности при аварийных проливах легковоспламеняющихся и горючих жидкостей (далее – ЛВЖ, ГЖ).

Рассмотрим существующие технические решения, направленные на решение важной проблемы – снижение опасных факторов пожара (далее – ОФП) пролива ЛВЖ, ГЖ. Такие технические решения можно разделить на две группы: первая – ограничивающие растекание горючих жидкостей, вторая – ограничивающие растекание горючих жидкостей, а в случае воспламенения горючих смесей, снижающие геометрические и термодинамические параметры пламени, вплоть до полного затухания пламени [102, 123].

В первую группу можно выделить инженерно-технические решения, направленные на ограничение растекания горючих жидкостей и эвакуации пролитых жидкостей в аварийный резервуар:

- дренажные системы с отведением проливов ЛВЖ, ГЖ в аварийный резервуар [130];

- бортики, выполненные из негорючих материалов на твердой поверхности с системой аварийного слива горючих жидкостей [102].

Ко второй группе следует отнести:

- поддоны, оборудованные трубчатыми вертикальными каналами (гасителями пламени) [35-37];

- напольные противопожарные модули (*Modular fire prevention flooring*), в которых в качестве пламегасящего наполнителя используется металлическая стружка (вата) [42];

- поддоны с наполнителем из гранулированных материалов [40,41,107].

1.3.1 Нормативно-правовые основы применения технических устройств, ограничивающих растекание углеводородных жидкостей

Применение поддонов для локализации и повышения эффективности тушения аварийных проливов углеводородных жидкостей, регламентируется рядом требований нормативных документов по пожарной безопасности, представленных в [102].

В СП 13.13130.2009 введено понятие «поддоны самотушения» для предотвращения и подавления пожаров ЛВЖ и ГЖ [14]. Так при размещении емкостей с горючей жидкостью в подвале допускается выполнять под емкостями устройства самотушения проливов из расчета удержания всего объема жидкости с дальнейшей откачкой ее насосом в сборный бак за пределами здания [102].

В рекомендациях «Обеспечение пожарной безопасности установок по ликвидации аварийных проливов нефти и нефтепродуктов» [15] указано, что поддон для сбора нефти и нефтепродуктов необходимо применять под вентилями, связанными с обращением горючих жидкостей [130].

В Правилах противопожарного режима в Российской Федерации указано, что под трансформаторами и реакторами требуется располагать маслоприемные устройства с гравийной засыпкой, при этом предъявляется ряд требований к содержанию гравия [16, 102].

В Правилах устройства электроустановок (7-е издание) приведены габариты маслоприемника в зависимости от количества масла в трансформаторе, кроме того, указана высота слоя гравия (не менее 0,25 м), размер фракции гравия (от 30 до 70 мм) [17, 102].

В ГОСТ Р 12.3.047.2012 приведен метод расчета размера сливных отверстий из технологического оборудования (поддонов, отсеков), который устанавливает порядок расчета площади сливного отверстия в ограничивающем жидкость устройстве (поддоне, отсеке, огражденном бортиками участке цеха, производственной площадке и т.п.), при котором исключается перелив жидкости через борт ограничивающего устройства и растекание жидкости за его пределами. Целью расчета является выбор площади поддона $F_{п}$, m^2 , и расчет площади сливного отверстия f , m^2 [18, 102].

В СП 155.13130.2014 для площадок сливо-наливных эстакад регламентировано применение водонепроницаемого покрытия, огражденного бортиком, высотой не менее 0,2 м, и уклоном не менее 2% [19]. Аналогичное

инженерно-техническое решение прописано в СП 156.13130.2014 для площадок слива автоцистерн [20, 102].

Применение переносных поддонов для сбора локальных утечек горючих жидкостей под разъемными соединениями трубопроводов предусматривает Международный стандарт по безопасности для нефтяных танкеров и терминалов [21, 102].

В ряде сводов федеральных законов США [22-25] содержатся нормы, предписывающие обеспечивать устройствами сбора локальных утечек горючих жидкостей технологическое оборудование, на котором проводятся сливо-наливные операции ЛВЖ, ГЖ, осуществляются перевозки и хранение ЛВЖ, ГЖ в таре [102].

1.3.2 Анализ исследований в области пассивного гашения пламени углеводородных жидкостей в вертикальных каналах

Ряд теоретических и экспериментальных исследований параметров горения жидкостей и газов в резервуарах, горелках, трубках различного диаметра направлены на выработку условий пассивного гашения пламени углеводородных жидкостей вертикальных каналах [26-31].

Наибольшее распространение в России в качестве технических устройств, влияющих на снижение пожарной опасности локальных аварийных проливов углеводородных жидкостей, получили поддоны-приемники горючих жидкостей в виде модулей напольных покрытий, с расположенными в них слоями вертикальных осесимметричных труб одинакового размера в сечении. Устройствам самотушения горящих жидкостей в вертикальных каналах посвящен ряд экспериментальных работ [32-38].

В данном способе, пассивного пожаротушения, гашение пламени достигается из-за сокращения естественных конвективных потоков воздушной среды, поставляющих в достаточном количестве окислитель в зону

горения, а также уменьшения количества паров, поставляемых в зону реакции горения при уменьшении тепловых потоков от излучения пламени.

В работе [37] приведена принципиальная схема динамики развития процесса тушения пламени в отдельно взятом вертикальном канале, Рисунок 1.17.

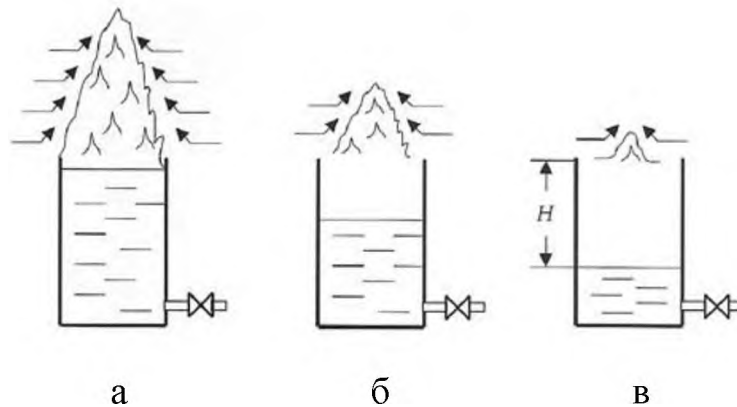


Рисунок 1.17 Схема развития процесса тушения пламени в вертикальном канале

Суть гашения пламени в вертикальном канале состоит в следующем: при понижении уровня жидкости в вертикальном канале, расстояние между зоной горения и жидкостью увеличивается, происходит снижение количества окислителя, поставляемого конвекцией, резко ослабевает тепловой поток, вызывающий испарение жидкости, и вследствие этого падает интенсивность процесса горения, а пламя уменьшается в размерах [37].

В диссертации Коротких В.Ф. [36] представлено численное соотношение, определяющее H_{np} (предельную высоту вертикального канала) в зависимости эффективного диаметра канала $d_{эф}$ и плотности жидкости ρ :

$$H_{np} \geq 12 \cdot d_{эф} \geq \frac{78 \cdot \sqrt{4 \cdot \sigma}}{\rho \cdot g} \quad (1.3)$$

где $d_{эф}$ - эффективный диаметр канала, мм; ρ - плотность жидкости, кг/м³; g - ускорение силы тяжести, м/с²; σ - вязкость, Сст.

Эксперименты с горючими жидкостями показали, что указанное соотношение дает значение H_{np} значительно превышающее величину, получаемую в опытах с различными жидкостями. В связи с этим, в работе [36]

предельные условия диффузионного горения в вертикальном канале и геометрические параметры последних определены экспериментально.

Разработана методика определения предельной высоты вертикального канала H_{np} , при которой горение находящейся в нем ЛВЖ или ГЖ прекращается. Суть метода состоит в следующем: исследуемая жидкость наливалась в емкость с электронагревателем и нагревалась до заданной температуры, затем жидкость сливалась по трубопроводу «нижнего слива» в исследуемую емкость (вертикальный канал), далее производилось зажигание паров жидкости в вертикальном канале электрозажигалкой, через 60 сек устойчивого горения жидкость медленно сливалась через патрубок в приемную емкость до момента гашения пламени. С помощью мерной трубки, прикрепленной к исследуемой емкости, определялся уровень жидкости в момент потухания. При повторном опыте количество горячей жидкости заливалось до уровня, полученного в предыдущем опыте. Опыты повторялись до трех раз [36].

Определено, что для каждого вида горючей жидкости при заданном значении S канала существует свое H_{np} , ниже которой существование пламени невозможно.

Получены зависимости изменения высоты потухания пламени в каналах различного диаметра ($d = 0,014 \div 0,09$ м) в зависимости от температуры кипения жидкости. Были установлены следующие закономерности: а) для всех исследованных жидкостей, горение которых происходило в вертикальных цилиндрических каналах, существует предельная глубина уровня жидкости H , при которой горение прекращается;

б) при фиксированном диаметре канала H зависит от вида жидкости и ее температурных показателей T . Для всех исследованных горючих жидкостей H изменяется в зависимости $H = f(T)$. Аппроксимированные данные методом наименьших квадратов представлены в виде линейной зависимости: $H = a + b \cdot T$.

По результатам исследования горения ЛВЖ, ГЖ в каналах различного диаметра были получены экспериментальные данные критической высоты горения $H_{кр}$. Так, например, для каналов малого диаметра $d = 24$ мм $H_{кр}$ получилась: бензина АИ-76 – 57 мм, ацетон (ч) – 73 мм; н-гексан (ч) – 60 мм, гептан (э) – 55 мм; толуол (ч) – 40 мм; керосин ОС-1 – 30 мм; трансформаторное мало ГОСТ 982-68 – 24 мм; изопропанол – 62 мм [36].

В работе Киселева Я.С., Хорошилова О.А. рассмотрены два способа предотвращения горения и самотушения с помощью устройств с узкими каналами [38]. Первый – предотвращение распространения пламени по газо-, паровоздушным смесям в сухих огнепреградителях. Второй – с помощью устройств самотушения горючих жидкостей при аварийных проливах, описанный выше.

Первый способ широко известен и имеет огромное практическое применение в аппаратах с дыхательными устройствами. Основным механизмом гашения пламени в сухих огнепреградителях тепловой. При прохождении пламени в тонком криволинейном канале огнепреградителя пламя разбивается на многочисленные тонкие струйки, происходит интенсивное охлаждение и падение скорости реакции и температуры до критической, при которой горение прекращается. Чем меньше диаметр канала и его длина, тем выше эффект огнепреграждения.

Механизм гашения пламени во втором способе состоит в ограничении доступа кислорода к зоне реакции горения. Отличается от первого тем, что в устройствах самотушения горючих жидкостей [32-37] один торец закрыт жидкостью (при проливе) и кислород может поступить только за счет диффузии от противоположного торца к пламени. Эффект гашения пламени в трубчатых каналах достигается при гораздо больших диаметрах d (от 10 до 40 мм), чем в огнепреградителях и определяется соотношением:

$$K_9 = \frac{H_{кр}}{d_{эк}} \quad (1.4)$$

$H_{кр}$ – высота незаполняемой части каналов, м;

d_{κ} – эквивалентный диаметр одного канала, м:

$$d_{\text{эк}} = \frac{4 \cdot F}{P} \quad (1.5)$$

где F – площадь поперечного сечения канала, м²; P – периметр сечения, м.

Несмотря на достаточную изученность процесса самотушения горящих жидкостей в вертикальных каналах трубчатых гасителей пламени вопрос снижения параметров испарения ЛВЖ без применения дополнительных изолирующих средств пока не решен.

1.3.3 Анализ исследований в области снижения пожарной опасности проливов углеводородных жидкостей с применением гранулированных материалов

Первые разработки в области снижения опасных факторов пожара пролива углеводородных жидкостей на основе применения гранулированных материалов появились в конце 70-х, начале 80-х гг. По данной теме выполнялись работы в ВИПТШ МВД СССР Бондаренко П.Г., Медведевым О.Н., Повзиком Я.С. и др., во ВНИИПО МВД СССР Агафоновым В.В., Ю.М. Сорокиным и др. [39-42].

Техническое устройство для защиты оборудования от прогрессирующего пожара представляет собой емкость с гравийным наполнителем (щебень, талька, гравий и керамзит) размером гранул 15-35 мм. Свободный от горючей жидкости слой должен быть не менее 30 мм [39].

Принцип работы данного устройства состоит в том, что пролитая горючая жидкость свободно проходит через зазоры между гранулами и растекается по всей площади емкости, при этом высота наполнителя должна превышать уровень жидкости не менее, чем на 30 мм для флегматизации и локализации горения. В таких условиях при воспламенении паров горючей жидкости образуется устойчивое пламенное горение, высота которого не

превышает 150 – 200 мм, а его температура 750 °С.

В работе [39] установлена экспериментальная зависимость высоты пламени от размера гранул наполнителя на противне 0,16 м², Рисунок 1.18.

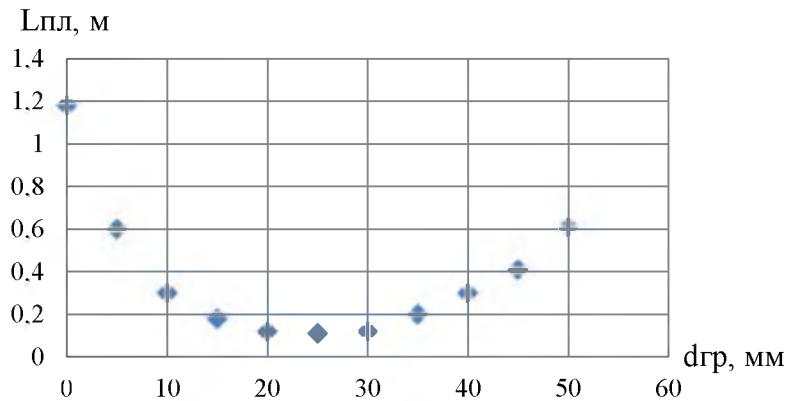


Рисунок 1.18 – Зависимость высоты пламени от размера фракции гравия

На графике Рисунка 1.18 видно, что максимальная высота пламени 1,2 м при засыпке емкости мелкой фракцией (песком), а минимальные значения высоты пламени 0,15 м соответствует диаметру гранул 20 – 30 мм. Авторами работы отмечено, что снижение высоты пламени до отметки 0,15 м от поверхности гранулированной подложки позволит сохранить оборудование, находящееся на высоте 600 мм, при этом количество огнетушащих средств (пены) затраченных на тушение значительно снизится.

Для предотвращения растекания масла и распространения пожара при повреждениях маслонеполненных силовых трансформаторов разработан маслоприемник в виде емкости с гравийным гасителем пламени, нагревательным элементом для предотвращения обледенения и маслоотводом [41]. Высота гравийного слоя в маслоприемниках не должна быть менее 0,25 м, а размер фракции гравия или щебня 30 – 70 мм [17].

Для повышения эффективности и экономичности пожаротушения полярных жидкостей был разработан способ тушения. Для ограничения растекания аварийного пролива ГЖ, ЛВЖ используют поддон, в который в качестве экранирующего материала засыпается гравий или щебень фракцией

5 – 40 мм. Наполнитель занимает объем равный объему емкости, при этом высота свободного (не занятого горючей жидкостью) слоя гранул должна быть 3 – 10 см. Снижение характеристик пламени достигается за счет флегматизации и локализации горения. В качестве огнетушащего вещества подается 6 %-ный раствор пенообразователя ПО-1Д низкократной пены (кратность 5-10) интенсивностью 0,2 л/м²·с [40].

Был проведен ряд экспериментов по эффективности пожаротушения полярных жидкостей (изобутиловый спирт) пенообразователем ПО-1Д в поддонах размерами 1×0,3×0,3 м, а также 2×2×0,25 м, наполненных гранулированными материалами. Результаты экспериментов сведены в Таблицу 1.4.

Таблица 1.4 – Результаты экспериментов по эффективности пожаротушения полярных жидкостей

Материал	Размер гранул, мм	Время тушения, с	Примечание
Гравий	50-70	32,3	Разрушение пены за счет контакта с горючей жидкостью
Гравий	20-40	12,3	
Гравий	5-20	16,0	
Щебень	20-40	14,0	
Песок	3	46	Пламя полностью не потушено, так как продолжается горение в воронке, вымытой струй ГЖ во время пролива
Керамзитовый гравий с плотностью гранул 0,33 т/м ³	10-20	16,8	

В работе [107] отмечено, что наиболее эффективными ГМ для гашения пламени в поддоне для сбора ЛВЖ и ГЖ являются легкие пористые материалы (керамзит, вспученный вермикулит) с плотностью гранул 0,25-0,60 кг/м³ и толщиной слоя 0,05 – 0,12 м. При этом прекращение горения достигается за счет подачи распыленной пены с интенсивностью 0,2 кг/м²·с.

В более поздних работах [105-106] также исследовалось влияние ГП с нанесением гелеобразующего огнетушащего состава (ГОС) на эффективность

пожаротушения ЛВЖ в резервуарах. Отмечается, что слой ГП 7-10 см на порядок уменьшает массовую скорость выгорания жидкостей. Пожаротушение ЛВЖ состоит из двух этапов: подачи ГП на поверхность жидкости, а затем подачи ГОС. При этом не определена наиболее эффективная фракция ГП для тушения пламени при горении жидкостей.

Японскими учеными *T. Takeushi, T. Takashi, S. Ishizuka* и *T. Hirano* было проведено экспериментальное исследование характеристик горения жидкого метанола в емкости диаметром 0,1 м полностью заполненной гранулами в виде стеклянных шариков [43]. Диаметр шариков $d_{ш}$ составлял 0,2, 0,5, 1,4, 3 и 5 мм. Начальный уровень жидкости в емкости достигал уровня свободной поверхности гранул. При горении жидкости образовывалось 2 зоны гранул: зона 1 – в жидкой фазе и зона 2 – в паровой, Рисунок 1.19.

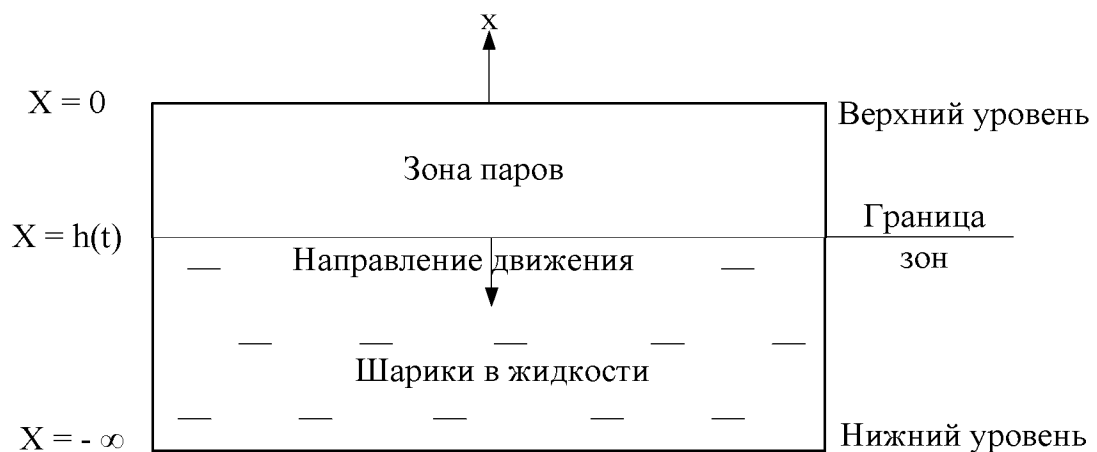


Рисунок 1.19 – Схема модели горения метанола в емкости с шариками

Температура на граничной поверхности двух зон равна температуре кипения жидкости T_k . Температура на свободной поверхности гранул равна температуры горения T_r . Температура на дне жидкости постоянна и равна температуре окружающей среды T_0 .

Определены скорости выгорания метанола, а также измерены температуры в пористых слоях. Скорость горения уменьшалась с увеличением диаметра шарика, так для полного гашения пламени при $d_{ш} = 0,2 \dots 1,4$ мм потребовалось 2400 с, при этом масса выгоревшей жидкости составила 0,1 кг,

при $d_{\text{шт}} = 5$ мм – 4500 с и 0,092 кг метанола, что свидетельствует о более низкой скорости горения метанола при $d_{\text{шт}} = 5$ мм. Максимальная скорость выгорания R (кг/с) метанола в эксперименте составила $8,0 \times 10^{-5}$ кг/с, минимальная – $1,5 \times 10^{-5}$ кг/с. По мере увеличения высоты зоны 1 (зоны паров, рис. 1.18) сокращался расход метанола.

Для каждой зоны уравнения теплопроводности имеют вид:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial T_1}{\partial t} &= a_1 \frac{\partial^2 T_1}{\partial x^2} \\ \frac{\partial T_2}{\partial t} &= a_2 \frac{\partial^2 T_2}{\partial x^2} \end{aligned} \right\} \quad (1.6)$$

где $T_1(x, t)$ и $T_2(x, t)$ - температуры в зонах 1 и 2 соответственно, a_1 и a_2 - коэффициенты температуропроводности в зонах 1 и 2.

Начальное условие:

$$\text{при } t = 0: T_1(x, 0) = T_2(x, 0) = T_0$$

$$\text{при } x = 0: T_1(0, t) = T_r$$

$$x = -h(t): T_1(h, t) = T_2(h, t) = T_k$$

$$\text{при } x \rightarrow -\infty: T_2(x, t) = T_0$$

$x = -h(t)$ – координата границы раздела 1 и 2 зон.

Движение границы зон $h(t)$ пропорционально \sqrt{t} и имеют вид

$$h(t) = 2\alpha\sqrt{a_1 t} \quad (1.7)$$

где α – коэффициент пропорциональности;

a_1 – теплопроводность паров;

t – время горения, с.

В работе [43] экспериментально было установлено, что высота пламени уменьшается с уменьшением скорости выгорания ЛВЖ по линейной зависимости. Повышение температур в слое гранулированной подложки по оси ординат имеет каскадный характер, то есть до достижения отметки x_1 (в точке измерения ниже уровня $x=0$) температура стремительно растет, при достижении отметки рост значительно замедляется, при этом температура становится равной температуре кипения $T_{\text{кип}}$. Затем снова прогрессирует рост температуры, который означает, что отметка x_1 попадает в «сухую» область,

расположенную выше уровня жидкости. При уменьшении высоты пламени сужается область горения в основании пламени. После смещения основания пламени от пристеночной области горелки рост температуры в точках по оси абсцисс значительно замедляется.

J. Zanganeh и *B. Moghtaderi* в работе [85] экспериментально изучали распространение пламени по пористой среде (песок размерами частиц 0,5 до 5 мм), пропитанной ЛВЖ (метанолом). Результаты, соответствующие распространению пламени по пористому слою для неподвижных, вспомогательных и противоположных конфигураций воздушного потока, показывают, что скорость распространения пламени уменьшается либо с увеличением размера частиц, либо с увеличением глубины пористого слоя. Однако было обнаружено, что скорость замедления более отчетлива для распространения пламени в условиях воздушного потока по сравнению с состоянием покоя. Скорость распространения пламени на глубину слоя 39,9 мм в спокойном состоянии уменьшалась с 1,2 м/с до 0,89 м/с с увеличением размеров частиц с 0,5 до 5 мм. Скорость распространения пламени снижалась по мере увеличения глубины пористого слоя.

Китайские ученые *W. Kong*, *Chr.Y.H. Chao*, *J. H.Wang* в работе [86] исследовали характеристики горения метанола на подложках из песка девяти фракций (средний диаметр гранул в диапазоне 0,12-3,18 мм) при толщине подложки (80, 70, 60 и 50 мм). По мере выгорания метанола уровень жидкости опускался при этом увеличивалась высота «сухой» зоны песка. При увеличении размера фракции песка время горения увеличивалось, скорость горения снижалась. На начальном этапе горения капиллярные силы в подложках более мелких фракций песка, практически, не влияют на характеристики горения, доминирующим фактором прогрева слоев жидкости является теплопередача. По мере выгорания топлива увеличивается расход топлива у подложек из мелких фракций по сравнению с более крупными за счет влияния капиллярных сил. Профиль температур в слоях подложек из

песка при горении метанола показал, что мелкие фракции прогреваются в глубину гораздо быстрее, Рисунок 1.20.

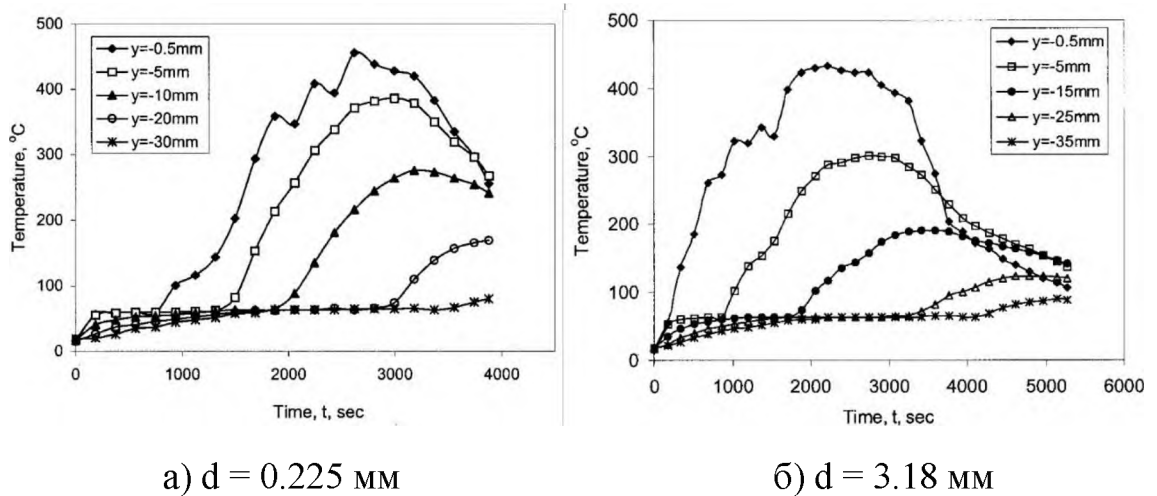


Рисунок 1.20 Изменение температуры на различных уровнях подложки из песка толщиной 80 мм при горении метанола

Температурный максимум показали термопары на отметке – 0,5 мм (450 °С) у наименьшей, так и у самой крупной фракции песка, прогрев слоев на отметках -15 мм – -35 мм происходил интенсивнее у мелкой фракции.

Гранулированные материалы, в частности, пеностекло предлагалось использовать в качестве покрытий зеркала резервуаров для сокращения потерь от испарения нефти и нефтепродуктов [53-55]. Гранулированное пеностекло обладает положительной плавучестью при плотности гранул 0,4...0,5 г/см³, низкой гигроскопичностью, высокой морозостойкостью.

Одним из преимуществ гранулированной слоя из пеностекла перед трубчатыми гасителями пламени является значительное снижение параметров испарения углеводородных жидкостей. Эмпирические данные в работе [54] показывают, что абсолютные потери бензина в резервуарах с применением ГП (размерами гранул 3...15 мм, при средней толщине слоя гранул 36 мм) сократились на 5 % (относительные на 14%) по сравнению с понтонами, на резервуарах с покрытием.

1.4 Анализ свойств гранулированных материалов

В настоящее время существует множество современных негорючих гранулированных материалов, которые могут быть применимы в качестве подложки для снижения пожарной опасности локальных проливов нефтепродуктов. Совершенствуя существующие способы тушения углеводородных жидкостей с применением гранулированных материалов необходимо обеспечить быструю ликвидацию процесса горения пролива без подачи в зону горения огнетушащих веществ. Для этого проведена сравнительная характеристика физических свойств различных видов сыпучих материалов [56-62], характеристики которых сведены в Таблицу 1.5.

Таблица 1.5 – Свойства гранулированных материалов

Материал		Плотность, кг/м ³	Теплопроводность (в сухом виде), Вт/(м °С)	Устойчивость в воде	Прочность	Размер гранул, мм
Открытая пористость	Гравий керамзитовый [56]	250-600	0,1-0,7	слабоустойчив - устойчив	высокая	0-5; 10-20; 20-40
	Гравий шунгизитовый [56]	400-700	0,13-0,21	слабоустойчив - устойчив	высокая	0-5; 10-20; 20-40
	Щебень шлакопемзовый и аглопоритовый [56]	400-900	0,14-0,31	слабоустойчив	высокая	5-10; 10-20; 20-40
	Вспученный перлит (щебень) [57]	45-500	0,05-0,08	слабоустойчив	низкая	1-5; 5-10
	Вспученный вермикулит [58]	65-600	0,05-0,08	слабоустойчив	средняя	щебень
Закрытая (ячеистая) пористость	Пеностекло «Пеноситал» [59]	180-300	0,05-0,09	устойчив	высокая	3-5; 5-7; 10-20
	Poraver [60]	140-400	0,06-0,09	устойчив	высокая	1-2; 3-4; 4-8
	Зола-уноса ТЭС [61]	320-380	0,09-0,2	устойчив	высокая	0,1-0,5
	«ПенокерамТМ» [59]	180-300	0,07-0,09	устойчив	высокая	0,2-0,5
	Пеностекло «Термоизол» [62]	150-300	0,07-0,09	устойчив	высокая	1-4; 5-7; 10-15; 20-30

Анализ характеристик гранулированных материалов показал, что гранулированный материал пеностекло «Термоизол» является самым низкогигроскопичным, легким, термостойким, наименее теплопроводным материалом. Пеностекло «Термоизол» представляет собой высокопористый ячеистый неорганический теплоизоляционный материал, получаемый спеканием тонкоизмельченного стекла и газообразователя. По сравнению с другими гранулированными материалами обладает сочетанием следующих свойств: теплопроводность (в сухом состоянии 0,04 – 0,07 Вт/м·К) ниже, чем у большинства углеводородных жидкостей, термостойкость более 700 °С, водопоглощение (8 – 10 %), насыпная плотность от 150 - 300 кг/м³ [124].

Гранулированное пеностекло марки «Термоизол» не горит и не поддерживает горение, относится к группе негорючих материалов (НГ). Химическая стойкость материала наряду с его негорючестью, морозостойкостью, влагостойкостью создает возможность его использования в различных агрессивных средах [124]. Зависимости теплопроводности и паропроницаемости от насыпной плотности различных фракций гранул представлены на Рисунках 1.21, 1.22.

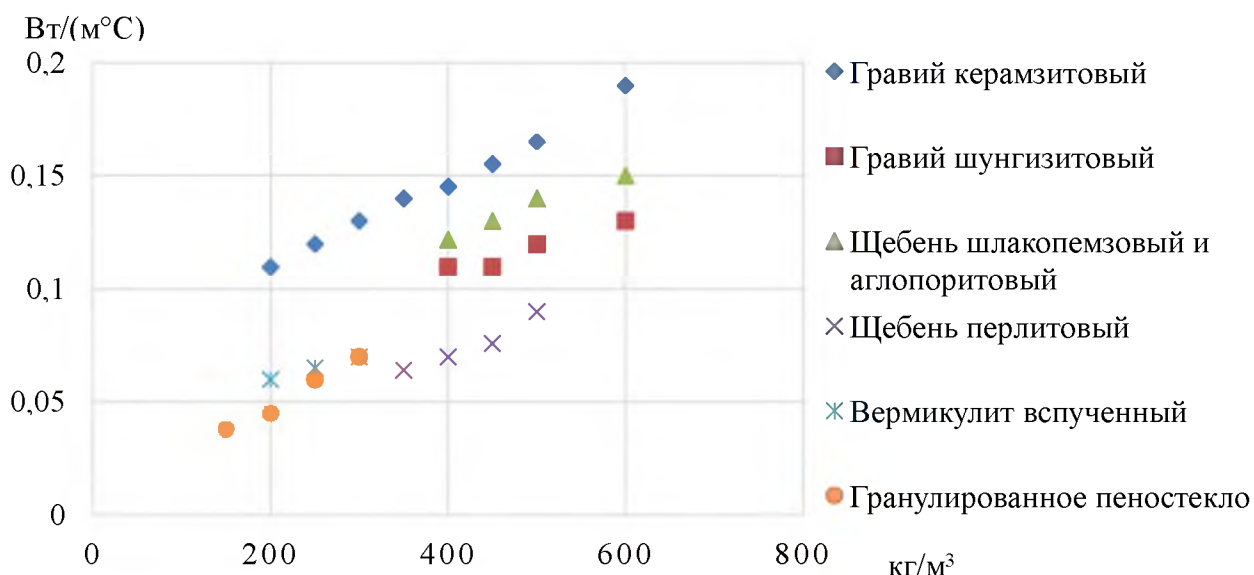


Рисунок 1.21 – Теплопроводность гранулированных материалов по отношению к их насыпной плотности

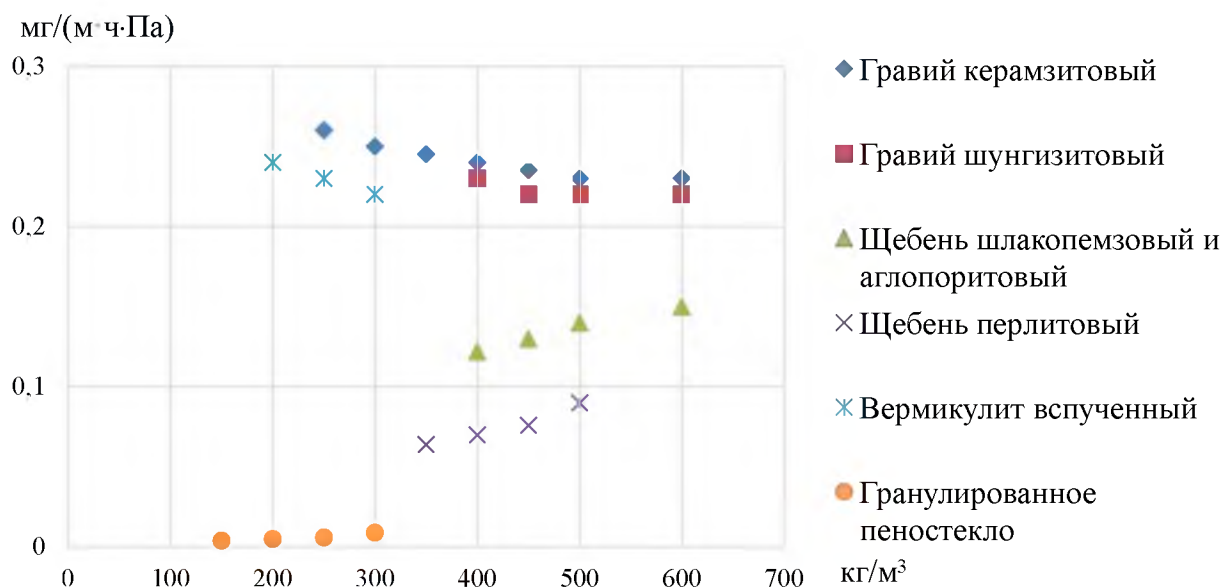


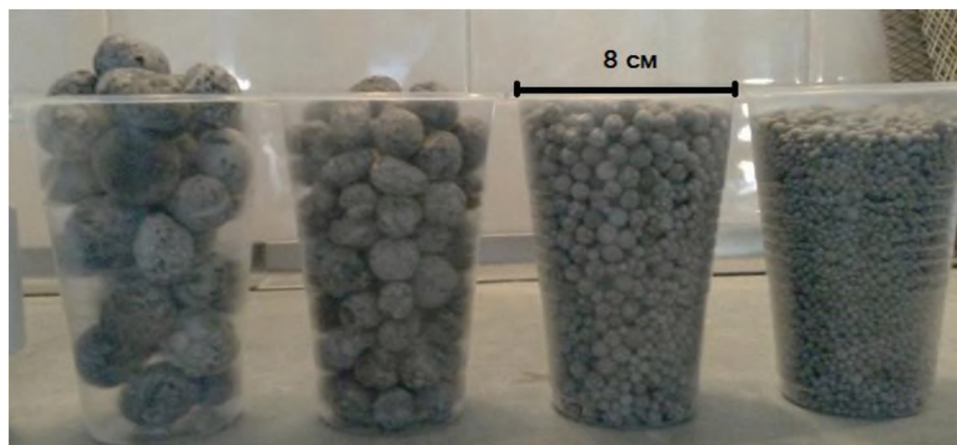
Рисунок 1.22 – Паропроницаемость гранулированных материалов по отношению к их насыпной плотности

Гранулированное пеностекло марки «Термоизол» производится четырех фракций в соответствии с техническими условиями: крупная фракция 20-30 мм и плотностью $150 (\pm 50)$ кг/м³; средняя – фракции 10-15 мм плотностью $200 (\pm 50)$ кг/м³; меньше средних $150 (\pm 50)$ кг/м³ – фракции 5-7 мм плотностью $210 (\pm 50)$ кг/м³; мелкая – 1-4 мм плотностью более $300 (\pm 50)$ кг/м³ [62]. Теплофизические свойства пеностекла «Термоизол» сведены в Таблицу 1.6.

Таблица 1.6 – Теплофизические свойства пеностекла «Термоизол»

Размер фракции, мм	Насыпная плотность, кг/м ³	Температура получения, °С	Водопоглощение, %	Теплопроводность Вт/(м·°С)	Паропроницаемость, мг/(м·ч·Па)	Коэф. теплопроводности Вт/(м ² ·°С)
1-4	300	850	8	0,07	0,009	0,45
5-7	210	850	8	0,06	0,006	0,39
10-15	200	850	10	0,045	0,005	0,33
20-30	150	850	10	0,038	0,004	0,30

На Рисунке 1.23 представлен общий вид гранул пеностекла «Термоизол» различных фракций.



слева направо фракции 20-30; 10-15; 5-7; 1-4 (мм)

Рисунок 1.23 – Гранулированное пеностекло марки «Термоизол»

Фракций гранулированного пеностекла отличаются по насыпной плотности разное положение в емкости, наполненной жидкостью. Чем меньше фракция гранул пеностекла, тем она тяжелее, а значит в условиях всплытия ее часть, погруженная в жидкость, будет больше, чем у крупных фракций.

При увеличении уровня залива жидкости в емкости с гранулированным пеностеклом до критического, когда слой гранулированного пеностекла (далее – СГП) отрывается от дна емкости под действием архимедовой силы $F_a > F_{ж}$ достигаются «наихудшие» условия. При этом высота «сухого» слоя, играющего роль экрана над поверхностью испарения жидкости, становится минимальной или равновесной.

Важной задачей является определение оптимальной фракции СГП при минимальном расходе материала, а именно, когда равновесная высота «сухого» слоя при соответствующем эквивалентном диаметре канала обеспечивает максимальное снижение параметров испарения (скорости, интенсивности) и гашение пламени.

Критериями эффективности снижения пожарной опасности локальных проливов ЛВЖ гранулированной подложкой из пеностекла в условиях равновесного состояния будут являться: максимальная высота «сухого» слоя гранулированного пеностекла и минимальный диаметр гранул.

1.5 Выводы по первой главе

1. По статистике пожаров на объектах нефтегазовой отрасли пожар пролива является наиболее вероятным среди сценариев его развития. Пожары, связанные с локальными проливами углеводородных жидкостей по их количеству значительны, при этом в зданиях и на наружных технологических установках они распределяются, практически, поровну. Основными причинами пожаров в предметной области исследования являются: неисправность производственного оборудования, неосторожное обращение с огнем, нарушение требований пожарной безопасности при проведении ремонтных работ.

2. Аналитический обзор пожаров на объектах нефтегазовой отрасли показал, что локальные проливы углеводородных жидкостей наиболее часто происходят при проведении сливо-наливных операций, отборе проб и при проведении ремонтных работ на технологических трубопроводах и насосном оборудовании в местах разъемных соединений и характеризуются быстрым распространением огня с возможной эскалацией пожара. Основными источниками зажигания являются заряды статического электричества, фрикционные искры, образуемые в результате механического воздействия.

2. Анализ технических устройств, направленных на ограничение растекания горючих жидкостей, показал, что наиболее простыми, экономически малозатратными являются поддоны с гранулированными наполнителями, изолирующими поверхность пролива. Однако, вопросы снижения пожарной опасности локальных проливов углеводородных жидкостей гранулированными материалами изучены недостаточно хорошо, а именно:

- не определены геометрические параметры гранулированного слоя (диаметра гранул, высоты слоя и др.), при которых возможно прекращение горения жидкости;

- не изучено поведение легких пористых материалов, в частности, пеностекла в условиях равновесного состояния на поверхности жидкости;

- отсутствуют зависимости параметров испарения углеводородных жидкостей с увеличением толщины гранулированного слоя.

3. Результаты отечественных исследований применения гранулированных материалов в качестве экранирования поверхности ЛВЖ, ГЖ ограничены минимальной высотой пламени, при этом не выработано условие прекращения горения без подачи воздушно-механической пены.

4. Исследования зарубежных ученых на примере скорости горения ЛВЖ (этанола) в емкости со стеклянными гранулами показали, что скорость горения и геометрические параметры пламени ниже у гранул диаметром 5 мм, по сравнению с гранулами диаметром 0,2..3,0 мм.

5. Анализ свойств различных гранулированных материалов показал, что гранулированное пеностекло марки «Термоизол» является одним из самых легких, низкотеплопроводных, низкогигроскопичных материалов, способным удерживаться на поверхности углеводородных жидкостей.

6. Актуальной задачей является разработка новых и совершенствование методов и средств, направленных на снижение пожарной опасности локальных проливов углеводородных жидкостей с помощью гранулированного пеностекла. Для решения данной задачи необходимо определить оптимальные геометрические параметры СГП (размер фракции и минимальную высоту слоя), при которых достигается эффект гашения пламени углеводородных жидкостей в емкости для их сбора, а также параметры испарения при экранировании поверхности жидкости СГП.

7. Обоснована необходимость разработки методики проведения испытаний СГП на эффективность снижения параметров испарения углеводородных жидкостей и способности гасить пламя при их проливе на ограниченной поверхности. Важной особенностью разработки установки для проведения испытаний является ее простота и обеспечение повторяемости условий проведения экспериментов.

ГЛАВА 2 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ИСПАРЕНИЯ УГЛЕВОДОРОДНЫХ ЖИДКОСТЕЙ И ГАШЕНИЯ ПЛАМЕНИ В УСЛОВИЯХ ЭКРАНИРОВАНИЯ ПРОЛИВА СЛОЕМ ГРАНУЛИРОВАННОГО ПЕНОСТЕКЛА

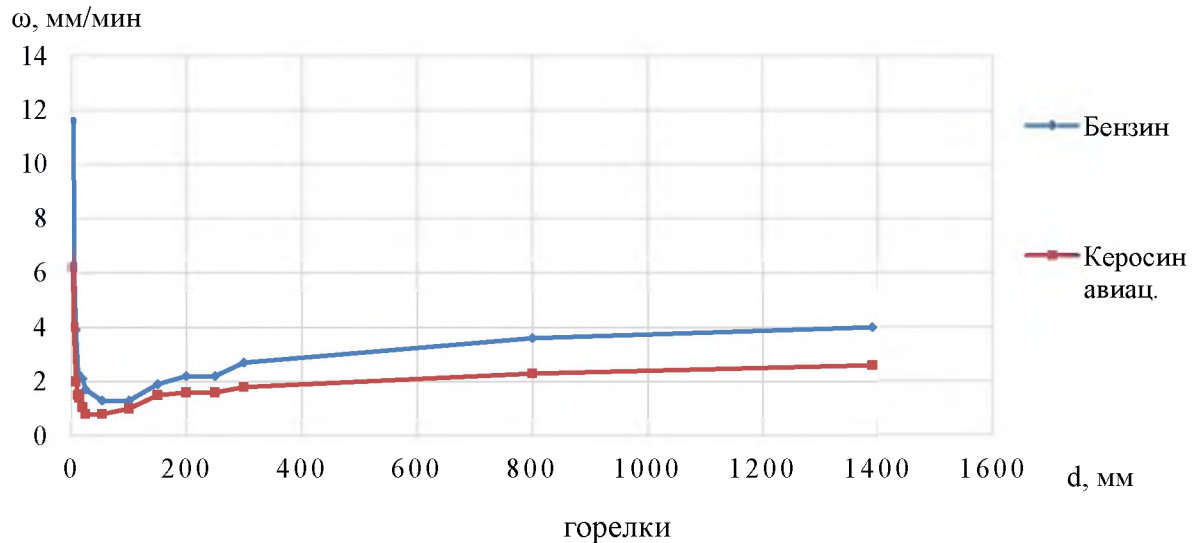
2.1 Влияние слоя гранулированного пеностекла на диффузионное горение углеводородных жидкостей

При пожаре пролива углеводородных жидкостей наблюдается диффузионное горение паров топлива в воздухе, подвод которых в зону химической реакции обеспечивается за счет их испарения с поверхности пролива [44].

Большую исследовательскую работу по теме диффузионного горения жидкостей провели В.И. Блинов и Г.Н. Худяков [27, 30, 46, 47, 52]. Конфигурация и динамика пламени при горении жидкостей в емкостях разного диаметра имеет различные режимы горения: горение в емкостях небольшого диаметра (менее 15 см) соответствует ламинарному режиму; горение в резервуарах с большим диаметром – турбулентному [47-50]. Пламя жидкости, сгорающей в горелках малого диаметра, является ламинарным и колебаний не имеет. Оно располагается над горелкой и при понижении уровня жидкости в горелку не опускается. Турбулентному режиму горения жидкостей присущи изменения высоты пламени с частотой мерцания 10-15 Гц и пульсации с отрывом пламени. Переход от ламинарного к турбулентному режиму горения свободно восходящих потоков, исходящих от пламени, рассматривал Я.Б. Зельдович еще в 1937 г. [51]. Определено, что вследствие особого профиля скоростей переходный режим начинается при числах Re значительно меньших 2000 и, равны 300-400 при горении ЛВЖ в горелке диаметром $d \approx 15$ см.

Исследование скорости выгорания жидкостей в резервуарах различных диаметров изучалось авторами работ [27,52], рисунок 2.1.

Рисунок 2.1 – Зависимость линейной скорости горения нефтепродуктов от диаметра



С увеличением диаметра горелки (>15 мм) скорость горения резко падает, а при диаметре (>50 мм) рост наблюдается плавное повышение скорости горения. Режим горения жидкостей остается ламинарным в горелках диаметром до 10 см, с увеличением диаметра емкости переходит в турбулентный режим [8, 30].

При экранировании поверхности жидкости пористым телом – слоем гранулированного пеностекла (СГП) площадь поверхности испарения уменьшается. С увеличением высоты СГП зона паров по высоте увеличивается, и так как область реакции горения, находится над поверхностью СГП, не проникая вглубь пористой среды, температура по нормали к поверхности испарения снижается, вместе с тем снижается и скорость испарения жидкости. С падением скорости испарения жидкости уменьшается скорость горения над поверхностью СГП и при определенных значениях происходит переход от турбулентного горения к ламинарному. В связи с этим пламя в условиях горения углеводородных жидкостей с экраном из СГП определенной толщины можно считать ламинарным.

Теория ламинарного диффузионного пламени впервые была предложена С. Бурке и Т. Шуманом в 1928 г [31]. При следующих граничных условиях: число молей газа $N = \text{const}$; температура пламени $T = \text{const}$; коэффициент диффузии газов $D = \text{const}$; скорости потока газа и воздуха равны $w_r = w_b = \text{const}$, была получена формула высоты ламинарного пламени:

$$H_{\text{пл}} = k \cdot \frac{\omega \cdot d^2}{D} \quad (2.1)$$

где $H_{\text{пл}}$ – высота пламени, м; ω – скорость истечения газа из горелки, м/с; d – диаметр горелки, м; D – коэффициент диффузии, м²/с; k – экспериментальный коэффициент пропорциональности.

Поскольку величина ωd^2 пропорциональна секундному расходу газа, из формулы (2.1) следует, что:

$$H_{\text{пл}} = \frac{V_{\text{сек}}}{D} \quad (2.2)$$

где $v_{\text{сек}}$ – расход газа, м³/с.

Диффузию пара в пористой среде подразделяют на свободную, когда длина свободного пробега молекулы λ значительно меньше диаметра поры d и кнудсеновскую – при λ много больше d .

Кнудсеновская диффузия молекул – есть диффузия по стенкам пор, с некоторой долей адсорбции [91]. Из-за низкой паропроницаемости гранулированного пеностекла (менее 0,01 мг/(м·ч·Па)) адсорбция паров жидкостей незначительна. Степень влияния эффекта проскальзывания газа в пористых средах характеризуется числом Кнудсена (Kn). Число Кнудсена – безразмерный параметр, определяемое как отношение длины свободного пробега молекул газа (λ_0) к среднему диаметру пор (d):

$$Kn = \frac{\mu \sqrt{\pi RgT}}{p \sqrt{2M} d} \quad (2.3)$$

где d – средний диаметр поры, м², M – молекулярная масса, Дж·моль⁻¹·К⁻¹, T – температура, Rg – газовая постоянная; μ – динамический коэффициент вязкости пара, Па·с; p – давление в капиллярах, Па.

Различают четыре основных режима течения газа в пористой среде в соответствии с классификацией Шафа и Чамбры [116]: неразрывное течение ($Kn \leq 0,001$); скользящий поток ($0,001 < Kn \leq 0,1$); переходный режим ($0,1 < Kn \leq 10$) и свободное молекулярное течение ($Kn \leq 10$).

В работе [92] эффективный коэффициент диффузии в пористой среде частично заполненной жидкостью представлен в виде эмпирической формулы:

$$\tilde{D} = D \cdot m^{3.5} \cdot \left(1 - \frac{m_l}{m}\right)^{3.5} \quad (2.4)$$

m – пористость слоя; m_l – «жидкая пористость», т.е. отношение объема жидкости ко всему объему пористой среды.

В идеальной пористой среде, где поры представлены в виде цилиндров с одинаковым сечением S и извилистостью β диффузионный поток в каждой поре можно записать так:

$$D_i = \frac{D \cdot S \cdot (c_1 - c_2)}{\beta \cdot l_k} \quad (2.5)$$

где $(c_1 - c_2) = \Delta c$ – разность концентраций в пористом слое; l_k – толщина пористого слоя или эквивалентная длина канала, м; β – извилистость канала; S – суммарная площадь сечения пор, m^2 .

Если представить пористую среду в поперечном разрезе площадью сечения S , то часть площади S_n будут занимать поры. Отношение площади общей сечения к площади всех пор называется просветностью:

$$n = \frac{S_n}{S} \quad (2.6)$$

Величина просветности зависит от характера разреза, однако среднее значение просветности для большого набора параллельных сечений какого-либо фиксированного образца равно пористости этого образца. Это свойство позволяет приближенно считать пористость m и просветность n практически равными величинами для реальных пористых сред со случайной структурой:

$n \approx m$ [94-96]. Диффузионный поток через экранирующий слой СГП можно выразить из формулы (2.5) через пористость m :

$$D_i = -D \cdot \frac{m}{\beta} \cdot \frac{\Delta c}{l_k} \quad (2.7)$$

В формуле (2.7) можно выделить геометрические параметры СГП, влияющие на процесс диффузии паров углеводородных жидкостей через пористый слой: длина l_k и извилистость β криволинейного канала «сухого» СГП, а также пористость слоя m , которые зависят от эквивалентного диаметра криволинейного канала $d_{эк}$. При этом длина криволинейного канала l_k связана с высотой «сухого» СГП, который в условиях равновесного положения зависит от насыпной плотности гранул пеностекла ρ .

Критериями эффективности экранирования СГП поверхности углеводородной жидкости является многократное снижение испарения с поверхности пролива и гашение пламени, которые зависят от геометрических параметров СГП: эквивалентного диаметра гранул d_g , эквивалентного диаметра канала $d_{эк}$, пористости гранулированного слоя m , извилистости канала β , длины криволинейного канала l_k . Последний параметр взаимосвязан с высотой «сухого» слоя H_c , которая изменяется при заполнении емкости с СГП жидкостью и является const в условиях равновесного положения СГП.

2.2 Условия гашения пламени при экранировании пролива углеводородных жидкостей слоем гранулированного пеностекла

2.2.1 Условия нарушения теплового баланса поддержания горения

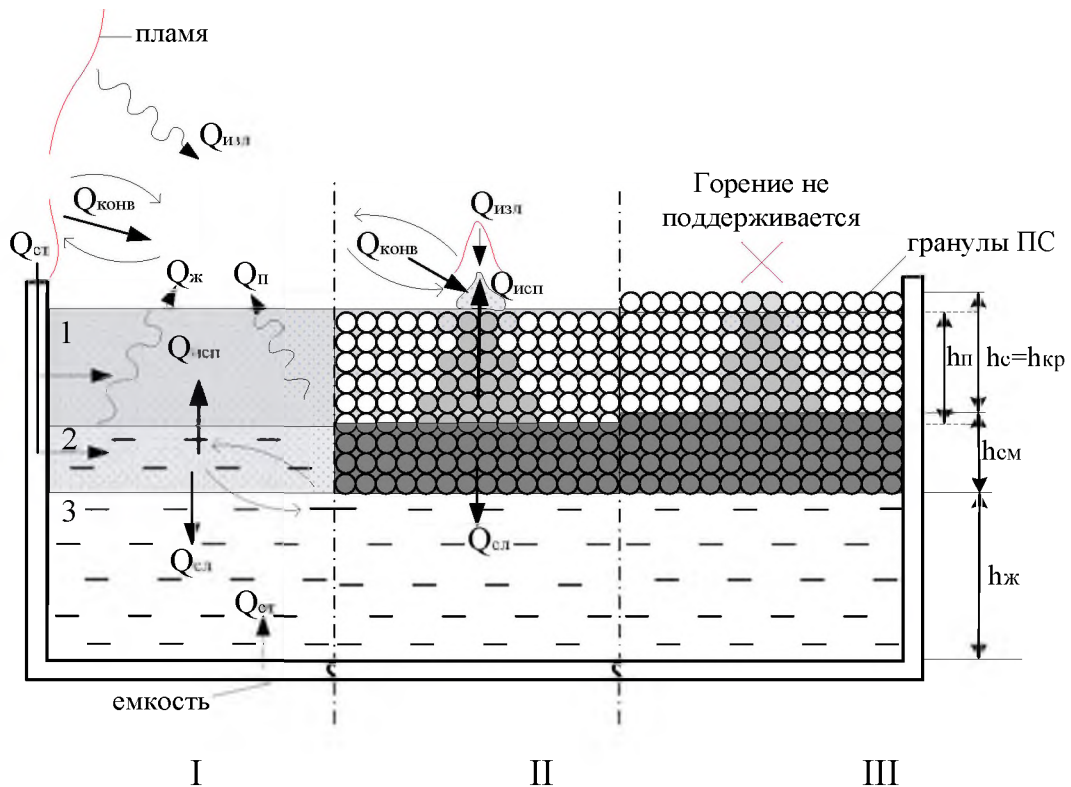
В основе теории диффузионного горения жидкостей заложен принцип неразрывности процесса испарения жидкости и подвода горючих паров в зону реакции горения. Для поддержания горения необходимо, чтобы с надлежащей скоростью поступало необходимое количество паров жидкости и кислорода в зону горения [30].

Тепловой баланс процесса горения жидкостей в емкости (поддоне) описан в работе [90] следующим равенством:

$$Q_{\text{изл}} + Q_{\text{конв}} + Q_{\text{ст}} = Q_{\text{исп}} + Q_{\text{ж}} + Q_{\text{п}} + Q_{\text{сл}} \quad (2.8)$$

$Q_{\text{изл}}$ – тепло от излучения пламени; $Q_{\text{конв}}$ – конвективное тепло от продуктов сгорания; $Q_{\text{ст}}$ – тепло, проводимое от стенки емкости; $Q_{\text{исп}}$ – тепло необходимое для испарения жидкости; $Q_{\text{ж}}$, $Q_{\text{п}}$ – тепло от поверхности жидкости и пара в окружающую среду; $Q_{\text{сл}}$ – тепло от поверхности жидкости на нагрев нижних слоев [89].

На Рисунке 2.2 представлена схема горения жидкости в емкости и влияние высоты СГП при его всплытии на гашение пламени.



$h_{\text{п}}$ – высота паров; $h_{\text{с}}$ – высота «сухого» слоя; $h_{\text{см}}$ – высота «смоченного» слоя; $h_{\text{ж}}$ – высота (уровень) жидкости; 1 – слой нагретых паров; 2 – нагретый слой жидкости; 3 – холодный слой жидкости

Рисунок 2.2 – Схема тепловых потоков при горении жидкости в емкости

В левой части I (рис. 2.2) соблюдается тепловой баланс равенства (2.1), в средней части II (рис. 2.2) – тепловой баланс частично нарушен, из-за

отсутствия тепла, проводимого от стенки емкости $Q_{ст}$, а также отсутствия тепла $Q_{сл}$, т.к. очаг горения над СГП локализован и не прогревает стенку емкости; в правой части III (рис. 2.2): горение не поддерживается из-за недостаточности времени поступления горючих паров к пламени. Нарушение временного баланса поддержания горения ЛВЖ достигается при критической высоте $H_{кр}$ «сухого» СГП.

В трубчатых горелках существует взаимосвязь скорости выгорания жидкости от ее уровня h в горелке (резервуаре), при понижении уровня h скорость горения уменьшается до некоторого критического значения $h_{кр}$, при котором происходит гашение пламени [27, 30, 47]. В «сухом» гранулированном слое значение $h_{кр}$ может быть несколько ниже за счет большего сопротивления движению молекул пара. Дело в том, что извилистость канала увеличивает путь пройденный молекулами пара, а большая площадь стенок канала образованных из полусфер гранул пеностекла увеличивает теплоотвод. Так как температура паровой фазы гораздо ниже температуры пламени, то увеличение высоты зоны паров приводит к увеличению более «холодной» паровой зоны по вертикали. Поверхность жидкости под «сухим» СГП получает меньше тепла $Q_{изл}$, $Q_{конв}$, и меньше его отдает $Q_{исп}$, $Q_{ж}$, $Q_{п}$, $Q_{сл}$, соответственно, снижается скорость испарения жидкости. Увеличение длины каналов СГП увеличивает время доставки паров в зону реакции горения, из-за криволинейности каналов увеличивается путь доставки молекул пара в зону реакции горения, при этом растет сопротивление движению потока молекул пара. Низкая скорость потока молекул пара будет способствовать снижению объема паров $V_{п}$, необходимого для поддержания горения, и при снижении $V_{п}$ до некоторого критического значения произойдет гашение пламени.

2.2.2 Условия нарушения временного баланса поддержания горения

Условие поддержания горения жидкостей в емкости с СГП можно записать в виде временного баланса поддержания горения:

$$\tau_r \geq \tau_{п.г.} \quad (2.9)$$

где τ_r – время сгорания объема паров над поверхностью жидкости, с;

$\tau_{п.г.}$ – время поступления горючего в зону реакции горения, с.

При активном сгорании паров над поверхностью зернистого тела возникает перепад давлений между нижней частью пористого материала и верхней его частью. То есть градиент давления $\Delta p/l_k$ возрастает из-за снижения давления p над свободной поверхностью капилляров СГП [93, 94].

Можно выделить два основных состояния горения жидкости с экраном в виде СГП:

- начало горения выходит на некоторый стационарный режим, при котором пламя постоянно поддерживается поступлением в зону горения продуктов реакции;

- начало горения имеет явно выраженный нестационарный характер, при котором горение быстро прекращается.

Экспериментальные исследования показывают [27, 47], что второй режим горения происходит от поверхности жидкости до верхней кромки горелки, а для СГП - длины капилляра (высоты «сухого» слоя гранул). Рост перепада давления приводит к тому, что в капилляре возникает волна пониженного давления, которая с некоторой скоростью распространяется по капиллярам до уровня жидкости, после которого происходит интенсификация испарения, и новая порция горючего с большей концентрацией молекул горения доставляется к вершине капилляра. Этот процесс занимает время, которое можно оценить по формуле:

$$\tau_{\Delta p} = \frac{2 \cdot l_k}{v} \quad (2.10)$$

где v – скорость волны пониженного давления в капилляре, которую можно записать, как скорость распространения волны в насыщенной паровой среде:

$$v = \sqrt{\gamma \frac{R \cdot T}{M}} \quad (2.11)$$

где γ – постоянная адиабаты в насыщенных парах ЛВЖ при температуре T ; M – молярная масса горючего вещества; R – газовая постоянная.

Тогда время доставки насыщенного пара в зону горения составит:

$$\tau = \frac{2 \cdot l_{\kappa}}{\sqrt{\gamma \frac{R \cdot T}{M}}} \quad (2.12)$$

Чтобы остановить процесс горения необходимо, чтобы время сгорания пара τ_2 было меньше времени поступления продуктов горения $\tau_{n.2}$:

$$\tau_2 < \tau_{n.2} \quad (2.13)$$

В условиях пролива углеводородной жидкости в емкость, наполненной СГП процесс гашения пламени можно описать, используя график зависимости изменения высоты зоны паров от высоты «сухого» СГП, Рисунок 2.3.

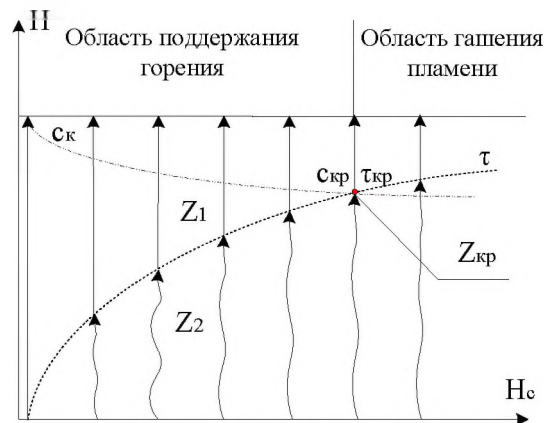
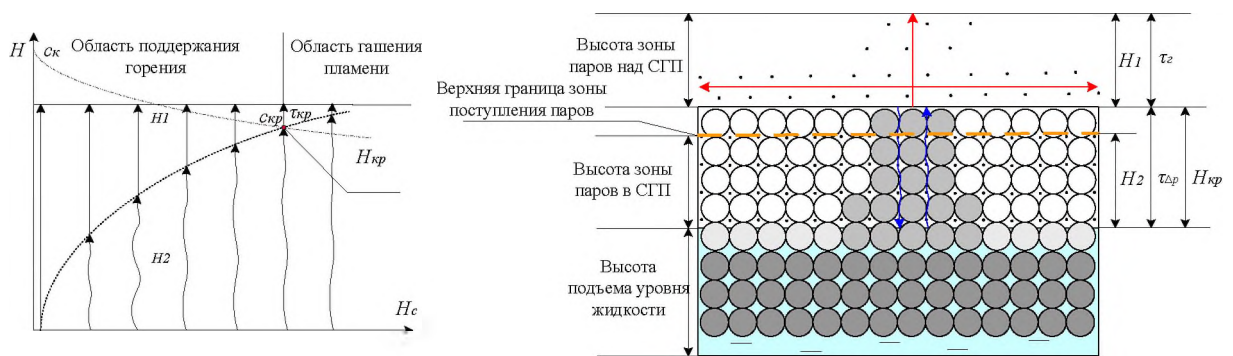


Рисунок 2.3 – График зависимости изменения высоты зоны паров от высоты «сухого» СГП

Из графика (Рисунок 2.3) следует: высота зоны паров, испарившихся с поверхности СГП Z_1 в определенный момент времени $\tau_1 = x$ постоянна $Z_1 = \text{const}$; высота зоны паров, испарившихся с поверхности жидкости в СГП Z_2

увеличивается с ростом высоты «сухого» СГП $Z_2 = H_c$; на прохождение молекулами пара расстояния равного H_c затрачивается время τ_1 и при некотором критическом значении H_c данное время становится больше времени сгорания паров τ_r , т.е. $\tau_r < \tau_{кр}$; с увеличением высоты «сухого» СГП H_c снижается концентрация кислорода c_k , поступающая за счет конвекции и при условии $H_c = Z_{кр}$ достигает значений, при которых поддержание горения становится не возможным. Схема гашения пламени при критической высоте «сухого» СГП представлена на Рисунке 2.4.



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

Рисунок 2.4 – Схема гашения пламени при критической высоте «сухого» СГП

Нарушение баланса горения при увеличении слоя СГП характеризуется следующими факторами:

1) Концентрация кислорода c_k , поступающая за счет конвекции, снижается по нормали к поверхности испарения. После сгорания паров над поверхностью СГП происходит обеднение кислородом области внутри гранулированного слоя, поэтому пламя не опускается ниже верхнего уровня гранулированного слоя, что влияет на падение температуры в слое СГП;

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

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

Характерное время сгорания τ_r зависит от высоты зоны, ограниченной НКПР паров $H_{нкпр}$ (H_1, H_2) и нормальной скорости распространения пламени u_n [9]. Характерное время сгорания паров можно определить по формуле:

$$\tau_z = \frac{Z_{нкпр}}{u_n}, \quad (2.14)$$

при этом высоту зоны, ограниченной НКПР паров можно найти, используя известную формулу:

$$Z_{нкпр} = 0,26 \cdot \left(\frac{m_n}{\rho_n \cdot C_{нкпр}} \right)^{0,33}, \quad (2.15)$$

где m_n – масса паров, кг; ρ_n – плотность паров, кг/м³.

Если время сгорания паров и время испарения (2.14) имеют равные значения, то мы наблюдаем устойчивый процесс горения на конце капилляра:

$$\tau_z \sim \tau_{\Delta p} \quad (2.16)$$

Если время доставки пара через СГП больше времени сгорания, то пламя погаснет по условию 2.9. Однако, возможно поддержание горение на локальном участке смоченной поверхности СГП. Дело в том, что на смоченных гранулах верхней части СГП образуется пленка углеводородной жидкости и для ее выгорания может потребоваться некоторое время.

2.3 Параметры фильтрации, влияющие на движение пара углеводородных жидкостей через слой гранулированного пеностекла

Для определения эффективности экранирования СГП поверхности пролива углеводородных жидкостей, заключающейся в снижении скорости испарения жидкостей или потери напора при прохождении потока пара через слой пористого материала в виде СГП удобно воспользоваться уравнением Дарси-Вейсбаха:

$$\Delta h_{mp} = \lambda \cdot \frac{l}{d} \cdot \frac{w^2}{2 \cdot g} \quad (2.17)$$

где λ – коэффициент трения (функция Рейнольдса); l – длина канала, м; d – внутренний диаметр канала, м; w – средняя скорость потока пара в канале м/с; g – ускорение свободного падения м/с².

Потерю напора удобнее выражать не через среднюю скорость w_c потока в каналах, а через фиктивную скорость w , т.е. скорость потока, отнесенную к полному сечению емкости с СГП:

$$w_c = \frac{w \cdot \omega}{\omega_c} = \frac{w}{m} \quad (2.18)$$

где ω – поперечное сечение потока, м²; m – пористость СГП.

Режим движения потока пара через слой гранулированного пеностекла определяется числовым значением критерия Рейнольдса. Так как гранулы пеностекла не идеального круглого сечения, то определяющим геометрическим параметром при подсчете Re следует отнести эквивалентный диаметр канала d_s :

$$Re = \frac{4 \cdot d_s \cdot \rho}{\mu} = \frac{4 \cdot w \cdot \rho}{f \cdot \mu} = \frac{4 \cdot u}{f \cdot \mu} \quad (2.19)$$

где μ – динамический коэффициент вязкости паров, Па·с; u – скорость потока, отнесенная к полному сечению емкости с СГП м/с; ρ – плотность паров кг/м³; f – удельная поверхность гранулированного пеностекла м²/м³:

$$f = \frac{6 \cdot (1 - m)}{d_{sp}} \quad (2.20)$$

где d_{sp} – средний эквивалентный диаметр гранул, м.

Потеря напора Δh от сопротивления может быть выражена через перепад давления:

$$\Delta p = \Delta h \cdot \rho \cdot g \quad (2.21)$$

В соответствии с (2.17) и (2.20) получим выражение, характеризующее потери напора Δp (н/м²) при прохождении пара через СГП:

$$\Delta p = \lambda \cdot \frac{H_c}{d_s} \cdot \frac{w_c^2}{2} \cdot \rho = \lambda \cdot \frac{H_c \cdot f \cdot \rho \cdot w^2}{8 \cdot \varepsilon^3} = \lambda \cdot \frac{H_c \cdot f \cdot u^2}{8 \cdot \varepsilon^3 \cdot \rho} \quad (2.22)$$

где H_c – высота «сухого» СГП.

В литературе приводятся ряд формул для расчета величины коэффициента λ :

$$\text{при } Re < 50 \quad \lambda = 220 \cdot Re^{-1}; \quad (2.23)$$

$$\text{при } Re > 50 \quad \lambda = 11,6 \cdot Re^{-0,25} \quad (2.24)$$

В работах [39, 43, 85, 86] показано, что при экранировании поверхности жидкости гранулированным слоем высота пламени значительно снижается, данный показатель прямо пропорционален скорости горения (2.1) и соответственно расходу горючих паров (2.2). При значениях высоты данного слоя близким критическим для поддержания горения можно предположить, что $Re < 50$, тогда в выражение (2.22) можно подставить соответствующее значение λ :

$$\Delta p = \frac{220}{Re} \cdot \frac{H_c}{d_k} \cdot \frac{w_c^2 \cdot \rho}{2} \quad (2.25)$$

тогда сопротивление R ($\text{н} \cdot \text{с} / \text{м}^3$), оказываемое потоку пара СГП или сопротивление фильтрации имеет вид:

$$R = \frac{110 \cdot \mu \cdot H_c}{m \cdot d_k^2} \quad (2.26)$$

где d_k - эквивалентный диаметр канала СГП может быть найден по известной формуле:

$$d_s = \frac{2 \cdot d}{3} \cdot \frac{m}{1-m} \quad (2.27)$$

где d_{ep} – эквивалентный диаметр гранулы пеностекла, мм, тогда из (2.26) получим:

$$R = \frac{248 \cdot \mu \cdot H_c \cdot (1-m)^2}{m \cdot d^2} \quad (2.28)$$

За время τ (с) через поверхность фильтрации в виде СГП F (м^2) пройдет соответствующий объем пара, который можно определить по формуле:

$$V = w \cdot F \cdot \tau = \frac{\Delta p}{R} \cdot F \cdot \tau \quad (2.29)$$

В условиях экранирования СГП поверхности пролива углеводородных жидкостей имеется критическое значение «сухого» СГП $H_{кр}$, зависящее от свойств паров углеводородных жидкостей μ , ρ , а также геометрических параметров СГП d_s , m , f , F , при которых параметры Re , w , Δp , R , V имеют свои критические значения.

2.4 Разработка математической модели расчета критической высоты «сухого» слоя гранулированного пеностекла на поверхности пролива углеводородных жидкостей, обеспечивающей гашение пламени

2.4.1 Модель пористой фильтрации по закону Дарси

При описании поведения жидкости в обычной (не пористой) среде используется система уравнений Навье-Стокса, в которую входят уравнение сохранения массы (неразрывности), сохранения импульса, уравнение сохранения энергии и термодинамическое уравнение состояния. В случаях изучения движения жидкости в пористых средах для получения замкнутой системы дифференциальных уравнений оказывается достаточным использовать только два закона сохранения – уравнения баланса массы и импульса [94, 110-115].

Закон сохранения массы

Интегральная формулировка этого закона для произвольного объема пористой среды V с границей имеет вид [94]:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho m dV = - \int_{\Sigma} \rho u \cdot n ds = - \int_V \nabla \cdot (\rho u) dV \quad (2.30)$$

где объем V неподвижен относительно пористой среды.

Последнее выражение при условии достаточной гладкости подынтегральных функций легко преобразуется к дифференциальной форме (уравнение неразрывности):

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho m) + \nabla \cdot (\rho u) = 0 \quad (2.31)$$

При условии, что плотность жидкости (пара) постоянна, а пористая среда не деформируется, то условие неразрывности будет $\nabla \cdot u = 0$.

Баланс импульса

Первым уравнением баланса импульса для случая медленного стационарного движения несжимаемой жидкости в неподвижной изотропной пористой среде было уравнение Дарси (*Darcy*), имеющее для фильтрации в поле силы тяжести следующий вид [94, 110]:

$$-\nabla p + \rho g - \frac{\mu}{k} u = 0 \quad (2.32)$$

здесь μ — динамическая вязкость жидкости; k — коэффициент, называемый проницаемостью пористой среды и зависящий от типа пористой среды; g — вектор ускорения силы тяжести.

По структуре уравнение Дарси похоже на микроскопическое уравнение Навье-Стокса для вязкой несжимаемой жидкости при $\mu = const$, находящейся в беспоровом пространстве [95]:

$$\rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + (v \cdot \nabla) v \right) = -\nabla p + \rho g + \mu \Delta v \quad (2.33)$$

При медленном течении внутри пористой среды, для которых и справедлив закон Дарси, инерционные силы много меньше вязких сил, что позволяет пренебречь стоящим слева в (2.33) членом [95]:

$$-\nabla p + \rho g + \mu \cdot v = 0 \quad (2.34)$$

В случае медленных течений паров через СГП сила сопротивления направлена противоположно скорости фильтрации, а ее величина прямо пропорциональна вязкости и модулю скорости фильтрации.

При $g = 0$ закон Дарси (2.32) приобретает вид:

$$u = -\frac{k}{\mu} \cdot \nabla p \quad (2.35)$$

Так как испарение углеводородных жидкостей через пористую среду СГП очевидно проходит в ламинарном режиме, линейный закон фильтрации Дарси удобно представить в виде:

$$u = \frac{k}{\mu} \cdot \frac{p_1^* - p_2^*}{l} = \frac{k}{\mu} \cdot \frac{\Delta p}{l} \quad (2.36)$$

Коэффициенты проницаемости и фильтрации связаны соотношением:

$$\frac{k}{\mu} = \frac{c}{\gamma} \quad (2.37)$$

где u – скорость фильтрации м/с; k – проницаемость среды, м²; $p_1^* = \gamma \cdot H_1 + p_1$ давление на $p_2^* = \gamma \cdot H_2 + p_2$ давления, приведенные к плоскости отсчета геометрических высот H_1 и H_2 – «жидкость - «сухой» СГП» и «верхняя граница «сухого» СГП», соответственно; γ – удельный вес, кг/м²; c – коэффициент фильтрации.

Закон Дарси справедлив при выполнении двух условий: для малых скоростей течения жидкости (пара) внутри пор, а также при условии, что жидкость является ньютоновской, т.е. касательное напряжение и градиент скорости линейно зависимы [110].

2.4.2 Закон фильтрации Форхгеймера

При больших скоростях фильтрации, характеризуемых критерием Рейнольдса, силы инерции становятся значительными, при этом связь между градиентом давления и скоростью течения остается нелинейной [117]. В данном случае закон Дарси обычно заменяется уравнением Форхгеймера, которое учитывает инерционные силы [94]:

$$-\Delta p = \frac{\mu}{k} \cdot u + \beta \cdot \rho \cdot u^2 \quad (2.38)$$

где β инерционный коэффициент Форхгеймера, м⁻¹.

Данный коэффициент учитывает инерционное сопротивление в пористых средах и зависит от геометрии пор и свойств среды.

В работе [94] приведен график зависимости функции $f(Re)$, полученной экспериментально для нескольких пористых сред, где величина f умножена на безразмерный коэффициент $2d^2/k$ в логарифмических координатах. Отклонения от закона Дарси, которому соответствует горизонтальный участок графика, начинаются при Re порядка единиц (числа Рейнольдса вычисляются по характерному размеру гранул). При дальнейшем повышении скорости фильтрации инерцией жидкости при ее движении в извилистом внутрипоровом пространстве уже нельзя пренебрегать и нужно пользоваться квадратичной зависимостью (2.39). При переходе через границу применимости закона Дарси движение жидкости (пара) в порах остается ламинарным, а переход к турбулентности происходит при достаточно больших числах Рейнольдса (около 100 — 300).

Закон фильтрации Форхгеймера может быть применим для процессов свободного горения углеводородных жидкостей при относительно небольшой толщине «сухого» СГП, когда скорости горения достаточно высоки и характерна турбулентность процесса горения.

2.4.3 Уравнение Бринкмана при движении пара в пристеночной области

В качестве альтернативы соотношениям Дарси, Форхгеймера (2.32) и (2.39) при описании динамики жидкости в пористых средах используется уравнение Бринкмана (H.C. Brincman) [109, 120]:

$$\Delta p = \frac{\mu}{k} \cdot u + \tilde{\mu} \cdot \Delta u \quad (2.39)$$

первоначально полученное автором в приближении больших значений пористости слоя гранулированной среды. Уравнение (2.40) представляет собой стационарное уравнение баланса объемных сил с размерностью (Н/м³).

Основное уравнение для вязкого режима течения, связывающего градиент давления со скоростью фильтрации и параметрами среды, было получено Козени-Карманом. В дальнейшем подобное уравнение записали в работе [118], описывающее течение жидкости при одновременном воздействии вязких и инерционных сил:

$$\frac{\nabla p}{l} = 150 \cdot \mu \cdot u \cdot \frac{(1-m)^2}{m^3 \cdot d^2} + 1.75 \rho \cdot u^2 \cdot \frac{(1-m)}{m^3 \cdot d} \quad (2.40)$$

Недостатком модельных уравнений внутренней динамики гранулированного слоя, связывающих градиент давления со скоростью фильтрации, является то, что они справедливы для бесконечной среды и не дают локальных параметров, в частности локальной скорости вблизи стенки канала с определенной пористостью, что важно для СГП внутри относительно небольшой емкости. В работе [119] получено уравнение, в которое входит локальная скорость, с использованием уравнения Бринкмана, объединяющее закон Дарси и вязкий член:

$$\mu \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - 72 \cdot B^2 \cdot \left(\frac{1-m^2}{m \cdot d} \right) \mu \cdot u \cdot \frac{\partial p}{\partial z} \quad (2.41)$$

где B – извилистость канала; z, x – продольная и поперечная координаты.

Уравнение (2.42) справедливо вблизи стенки на расстоянии одного диаметра. Однако, стенка нарушает изотропность расположения гранул, что может влиять на распределение скорости в этой области. В уравнении же (2.42) пористость m считается постоянной по всему сечению канала с засыпкой. Наибольшее искажение гидродинамической структуры может наблюдаться в пристеночной области гранулированного слоя на расстоянии, примерно, равного эквивалентному диаметру гранулы – там, где пористость отличается в наибольшей степени. В работе [119] уравнение (2.41) представлено в следующем виде при граничных условиях: $u(0) = 0$, $\frac{\partial u(l)}{\partial y} = 0$, где l – где полуширина канала в гранулированном слое:

$$\frac{\partial u}{\partial y} - 112.5 \left(\frac{1-m}{m} \right)^2 u = k \quad (2.42)$$

По результатам работы [119] отмечено, что максимальное значение скорости у стенки канала практически в 3 раза меньше скорости в центре канала. В связи с этим можно сделать вывод, что увеличенное значение скорости потока у стенки, полученное в ходе ряда экспериментальных работ [119], не связано с увеличенной пористостью гранулированного слоя вблизи стенки.

Таким образом, при эквивалентном диаметре емкости, значительно превышающем высоту «сухого» СГП $D \gg H_c$, изменением скорости фильтрации пара в пристеночной области, отличающимся от закона Дарси можно пренебречь.

2.4.4 Математическая модель расчета критической высоты «сухого» слоя гранулированного пеностекла на поверхности пролива углеводородных жидкостей, обеспечивающей гашение пламени

Пусть имеется цепочка образцов пористой среды, которые насыщены паром под давлением P_n . Если на конце крайнего образца такой сети пор начать отбор газа, которое может быть вызвано началом горения паров, то давление в нем упадет и возникнет разность давлений между второй и первой порой цепочки. Пар начнет перетекать из одной поры в другую и давление во второй поре уменьшится. Возмущение давления будет передаваться таким образом по всей цепочке пор, и тем быстрее, чем меньше сжимаемость пара и сопротивление его движению. Характерное расстояние l (м) такой волны за время τ (с) можно рассчитать по формуле, полученной из уравнения фильтрации жидкости (пара) в пористых средах Дарси (2.37) [64, 93, 94]:

$$l = 2 \cdot \sqrt{\frac{k \cdot P_n \cdot \tau}{2 \cdot m \cdot \mu}} \quad (2.43)$$

где k – проницаемость среды, m^2 ; P_n – давление насыщенного пара, Па; m – пористость среды, μ – динамическая вязкость паров, Па·с.

Представить пористую среду можно в виде системы капилляров (с некоторым коэффициентом извилистости), каждый из которых заполнен насыщенным паром ЛВЖ, с характерной длиной l , Рисунок 2.5.

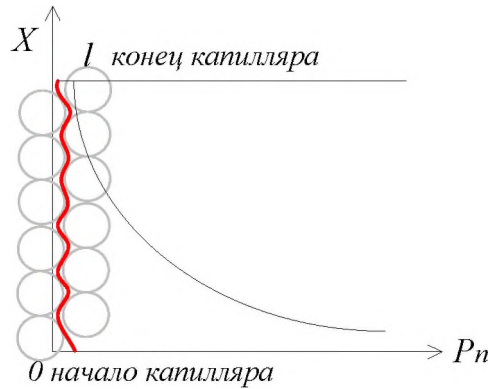


Рисунок 2.5 – Зависимость давления P_n , при сгорании паровоздушной смеси от координаты X

По осям отложено давление P , при сгорании паровоздушной смеси и координата X . На конце капилляра происходит скачок давления, вызванный началом горения паров ЛВЖ на конце капилляра, а в начальной точке капилляра давление падает.

Пусть внутри такого капилляра находится некоторый объем V насыщенного пара ЛВЖ. Для такого объема паров есть характерное время их сгорания τ_s . Для освобождения объема паров, находящихся в капилляре «сухого» слоя СГП, при некотором перепаде давления, требуется также некоторое характерное время $\tau_{\Delta p}$, которое можно оценить, используя формулу (2.43):

$$\tau_{\Delta p} = \frac{l^2 \cdot m \cdot \mu}{2 \cdot k \cdot P_n} \quad (2.44)$$

Используя формулу (2.44) и экспериментальные значения высоты l , при которых поддержание горения становится невозможным можно определить характерное время «перепада давления» $\tau_{\Delta p}$ и записать условие гашения пламени:

$$H_{кр} \geq \sqrt{\frac{2 \cdot k \cdot P_n \cdot \tau_{\Delta p1}}{m \cdot \mu}} \quad (2.45)$$

где $H_{кр}$ – критическая толщина «сухого» слоя, при котором происходит пламегашение.

Формула (2.45) показывает, какие факторы влияют на расчет «сухого» СГП. В связи с этим можно использовать относительные величины критических значений толщины «сухого» слоя СГП для паров различных ЛВЖ. А именно, определить значение $H_{кр1}$ для одного вещества (базового):

$$H_{кр1} \geq \sqrt{\frac{2 \cdot k \cdot P_{n1} \cdot \tau_{\Delta p1}}{m \cdot \mu_1}} \quad (2.46)$$

далее определить значения $H_{кри}$ относительно него, тогда получится:

$$H_{кри} \geq \sqrt{\frac{2 \cdot k \cdot P_{ni} \cdot \tau_{\Delta pi}}{m \cdot \mu_i}} \quad (2.47)$$

тогда отношение $H_{кр1}$ к $H_{кри}$ будет иметь вид:

$$\frac{H_{кри}}{H_{кр1}} = \sqrt{\frac{P_{ni} \cdot \mu_i \cdot \tau_{\Delta pi}}{P_{n1} \cdot \mu_1 \cdot \tau_{\Delta p1}}} \quad (2.48)$$

откуда можно выразить $H_{кри}$:

$$H_{кри} = \sqrt{\frac{P_{ni} \cdot \mu_i \cdot \tau_{\Delta pi}}{P_{n1} \cdot \mu_1 \cdot \tau_{\Delta p1}}} \cdot H_{кр1} \quad (2.49)$$

где P_{n1} и P_{ni} – давления насыщенных паров базовой и i -ой ЛВЖ; μ_1 и μ_i – динамические вязкости паров соответственно базовой и i -ой ЛВЖ; $\tau_{\Delta p1}$ и $\tau_{\Delta pi}$ – характерные времена «перепада давления» при сгорании базовой и i -ой ЛВЖ.

2.5 Оценка геометрических параметров слоя гранулированного пеностекла

Внутренняя поверхность порового пространства СГП имеет случайную структуру, поэтому подробно описать процесс тепло-, массопереноса в такой пористой среде затруднительно. Однако, в большинстве приложений, описанных в работах [110-113], характерные линейные размеры L

фильтрационных задач значительно больше характерного размера пор d , а при практическом изучении фильтрационных явлений обычно интересуются осредненными характеристиками процессов, происходящих в процессе фильтрации. Это позволяет при описании процесса испарения и горения жидкостей через пористую среду рассматривать СГП как сплошную среду, характеристики которой (плотность, давление, температура и т. д.) в каждой точке получаются в результате осреднения по некоторой окрестности в виде гранулы пеностекла с характерным линейным размером в виде радиуса r , содержащей достаточно большое число пор. При осреднении исходят из необходимости придерживаться соотношения $d \ll r \ll L$. Радиус r должен выбираться так, чтобы результаты осреднения мало зависели от объема шара $V_{сп}$ [113].

Вопросам движения жидкостей и газов в пористой среде посвящен ряд научных работ в период разработки и освоения нефтяных месторождений прошлого столетия [63-65]. В них рассматриваются параметры, оказывающие влияние на движение углеводородных жидкостей и газов в пористой среде. При определении пористости фиктивного грунта Лейбензон ссылается на метод Слихтера известный в теории фильтрации жидкости [63].

Основная модель пористости фиктивного грунта представляет собой ромбоэдр, образуемый из восьми одинаковых шаров с центрами, расположенными в вершинах фигуры, каждая грань которого представляет собой ромб. На Рисунке 2.6 показана форма сечения ромбоэдра при изменении угла расположения шаров.

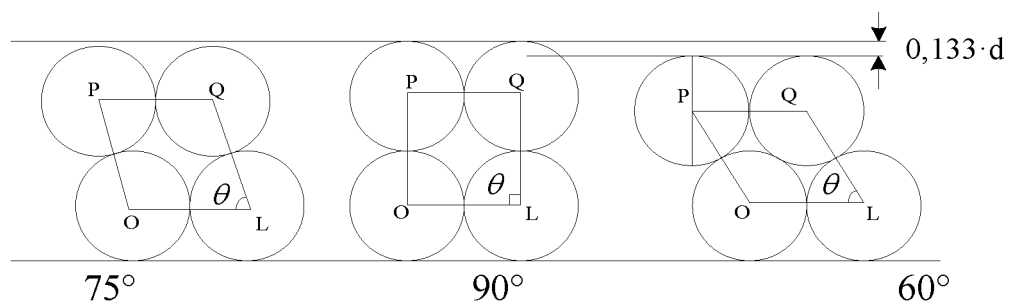


Рисунок 2.6 – Форма сечения ромбоэдра при изменении угла расположения шаров

Геометрическую пористость СГП можно определить по формуле Слихтера [63]:

$$m = 1 - \frac{\pi}{6(1 - \cos \theta) \cdot \sqrt{1 + 2 \cos \theta}} \quad (2.50)$$

из которой следует, что пористость фиктивного грунта, состоящего из одинаковых шарообразных гранул, не зависит от их диаметра, а зависит от их расположения, обуславливаемой величиной угла θ . Угол θ в форме сечения ромбоэдра изменяется в пределах от 90° до 60° таким образом, что при уплотнении слоя гранул этот угол приближается к 60° . Площадь основания ромбоэдра можно определить через диаметр шара d по формуле

В крайних значениях угла θ (60° и 90°) по формуле Слихтера пористость гранулированного слоя m равна 0,259 и 0,476 соответственно, а значит изменяется в интервале:

$$0,259 \leq m \leq 0,476 \quad (2.51)$$

Для точного определения геометрических параметров СГП был проведен эксперимент, по результатам которого были найдены значения истинной пористости СГП и средних эквивалентных диаметров гранул. Пористость СГП определялась по известной формуле:

$$m = \frac{V_n}{V_m} = \frac{V_m - V_{zp}}{V_m} = 1 - \frac{V_{zp}}{V_m} \quad (2.52)$$

где V_n – объем пор в ГС, м^3 ; V_m – объем, занимаемый гранулированной средой, м^3 ; V_{zp} – суммарный объем всех гранул, м^3 :

$$V_{zp} = (1 - m) \cdot V_m \quad (2.53)$$

При погружении слоя гранул в жидкость соблюдается равенство:

$$S \cdot h_0 = S \cdot h - N \cdot V_{Izp} \quad (2.54)$$

где S – площадь поверхности емкости, м^2 ; h_0 – начальная высота столба жидкости в емкости, м; h – высота столба жидкости после погружения слоя гранул, м.

С учетом (2.53, 2.54) пористость СГП можно определить из выражения:

$$S \cdot h_0 = S \cdot h - (1 - m) \cdot V_m \quad (2.55)$$

$$h - h_0 = \frac{(1 - m) \cdot V_m}{S} \quad (2.56)$$

$$1 - m = \frac{(h - h_0) \cdot S}{V_m} \quad (2.57)$$

$$m = 1 - \frac{(h - h_0) \cdot S}{V_m} \quad (2.58)$$

Зная пористость m можно определить средний объем одной гранулы \bar{V}_{1ep} из соотношения:

$$N \cdot \bar{V}_{1ep} = (1 - m) \cdot V_m \quad (2.59)$$

где N – количество гранул в емкости, шт.

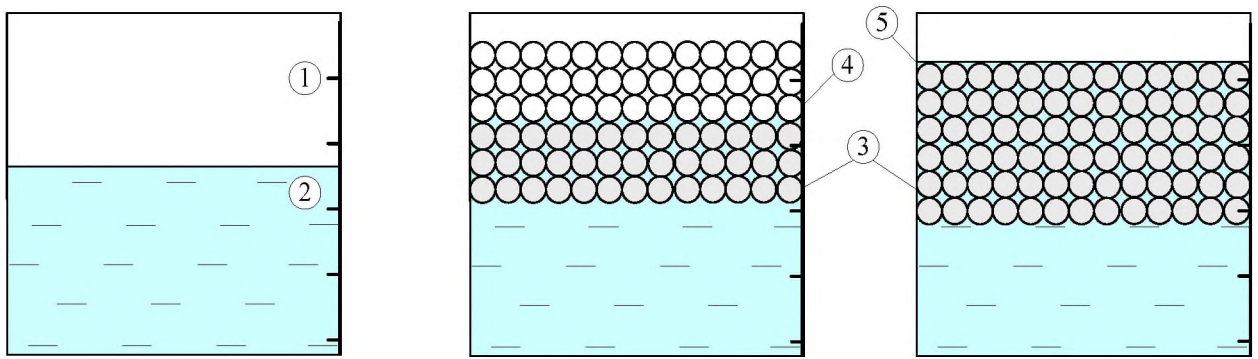
тогда:

$$\bar{V}_{1ep} = \frac{(1 - m) \cdot V_m}{N} \quad (2.60)$$

средний диаметр одной гранулы определялся по формуле:

$$\bar{d}_{ep} = \sqrt[3]{\frac{6 \cdot \bar{V}_{1ep}}{\pi}} \quad (2.61)$$

Для экспериментальной оценки параметров (2.59 – 2.61) в мерный стакан (1) наливалась нагретая до 90 °С вода (2) с целью исключения образования пузырей воздуха, измерялся ее уровень в емкости, затем насыпался СГП объема V_m . Из-за разной плотности жидкости и СГП часть гранул (3) была погружена в воду, другая часть гранул находилась над уровнем среза воды, образуя «сухой» слой (4). С помощью металлической сетки из тонкой проволоки ($d = 0,2$ мм), установленной в распорку внутри емкости СГП принудительно погружался под воду до полного погружения СГП в воду, эксперимент повторялся не менее 5 раз с разным составом фракций, Рисунок 2.7.



1 – емкость с мерной шкалой; 2 – вода; 3 – гранулы в воде; 4 – «сухие» гранулы; 5 – металлическая сетка

Рисунок 2.7 – Схема определения пористости СГП в мерной емкости с водой

Результаты экспериментального определения геометрических параметров СГП сведены в Таблицу 2.1.

Таблица 2.1 – Результаты эксперимента

Параметр	Фракция СГП 1-4 мм	Фракция СГП 5-7 мм	Фракция СГП 10-15 мм	Фракция СГП 20-30 мм
Диаметр емкости, см	5,2	5,2	15,0	15,0
Площадь емкости S , см ²	21,2	21,2	177,0	177,0
Начальный уровень жидкости H_0 , см	7,5	7,5	11,0	11,0
Уровень жидкости с гранулами, h , см	10,5	10,4	14,1	14,0
Объем всех гранул, V_m	100	100	900	900
Пористость СГП, m	0,365	0,385	0,390	0,410
Средний объем гранулы $\bar{V}_{гп}$, см ³	0,01	0,12	1,10	5,3
Средний диаметр гранулы $\bar{d}_{гп}$, см	0,28	0,61	1,28	2,17

Площадь прохода между гранулами в плоскости, содержащей их центры (рис. 2.6), можно определить по формуле:

$$S = S_1 - S_2 \quad (2.62)$$

где S_1 – площадь канала; S_2 – площадь частей кругов, лежащих внутри ромба S .

Площадь канала S_1 с диаметром шара d имеет вид:

$$S_1 = d^2 \cdot \sin \theta \quad (2.63)$$

Площадь частей кругов, вписанных в фигуру с вершинами OPQL (Рисунок 2.3):

$$S_2 = \frac{\pi d^2}{4} \quad (2.64)$$

Площадь прохода между гранулами можно выразить следующим образом:

$$S = \left(\sin \theta - \frac{\pi}{4} \right) d^2 \quad (2.65)$$

В программе *SketchUp Pro* была создана 3d модель слоев пеностекла при плотном расположении гранул друг к другу, одна из которых представлена в трех фракциях (5-7; 10-15 и 20-30), Рисунок 2.8.

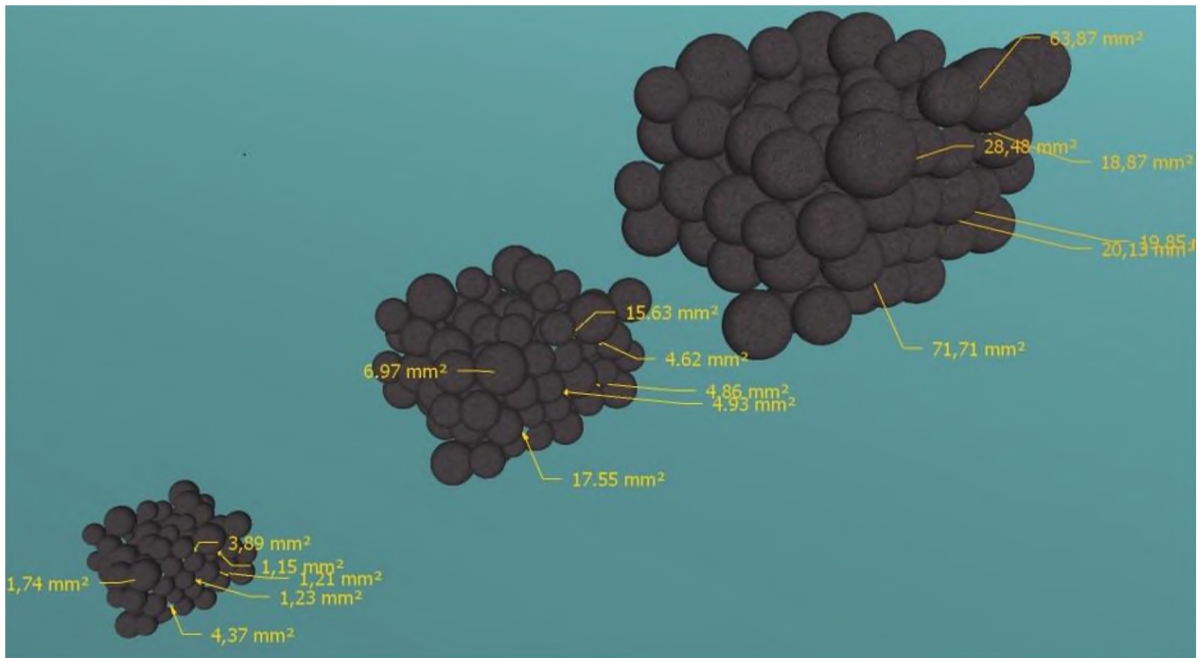


Рисунок 2.8 – Образцы 3d моделей фигур из гранул пеностекла

В фигурах близких по форме к кубу гранулы разных фракций расположены в одном порядке, образуя каналы одинаковой формы. В Таблицу 2.2 сведены площади сечения самой широкой части каналов разных фракций.

Таблица 2.2 – Площадь сечения каналов разных фракций СГП

№п/п	Площадь сечения канала, мм ²			
	Φ 1-4 мм	Φ 5-7 мм	Φ 10-15 мм	Φ 20-30 мм
1	0,29	1,15	4,62	18,87
2	0,30	1,21	4,86	19,85
3	0,31	1,23	4,93	20,13
4	0,43	1,74	6,97	28,48
5	0,97	3,89	15,63	63,87
6	1,09	4,37	17,55	71,71
Scp	0,56	2,26	9,09	37,15

Анализ внутренней структуры 3d модели показал, что при плотном расположении шаров ~ 70% каналов имеют форму «треугольника», Рисунок 2.9.

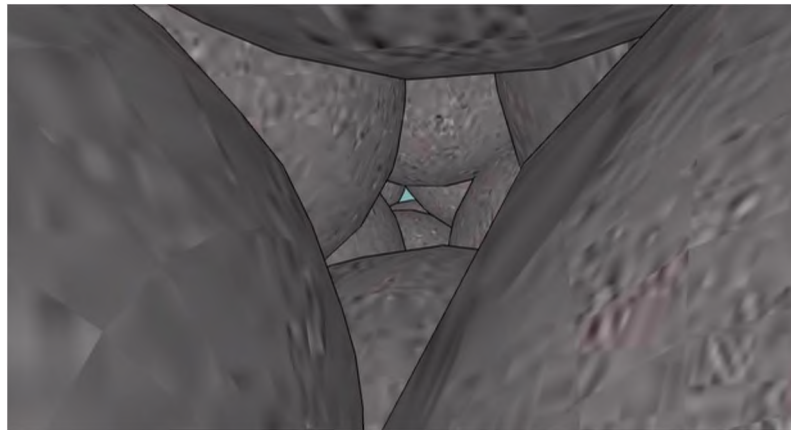
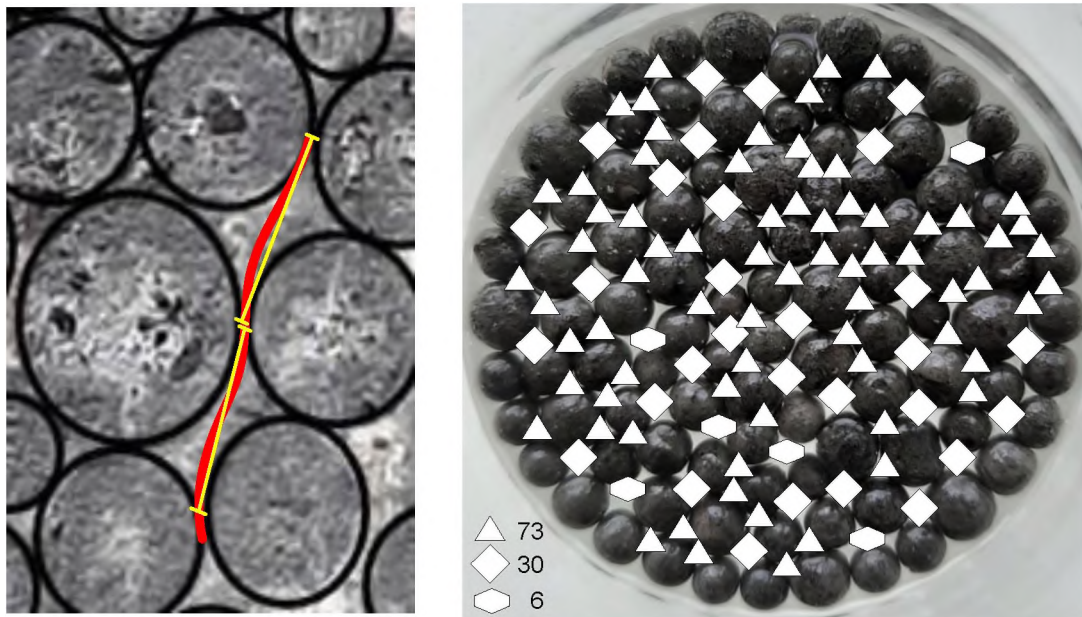


Рисунок 2.9 – Вид канала в 3d модели СГП

С увеличением размера фракции СГП площадь сечения канала увеличивается в ~ 4 раза. При одинаковой толщине слоя, количество рядов гранул меньших фракций значительно превосходит более крупных, что сказывается на росте числа криволинейных отрезков канала, за счет этого сопротивление движению паров жидкости будет больше.

При прохождении жидкости через СГП поток разбивается на тонкие струйки, проходящие между шарообразными гранулами, образующими в слое криволинейные каналы, Рисунок 2.10 а). Количество форм каналов СГП

фракции 5-7 мм при плотном расположении гранул в емкости $d=6$ см представлено на Рисунке 2.10 б).



а) разрез СГП

б) формы каналов СГП

Рисунок 2.10 – Слой гранул пеностекла

На Рисунке 2.10 а) красная линия – траектория движения пара, жидкости, желтая линия – отрезок канала между точками примыкания гранул. При наиболее тесном расположении шаров Слихтер заменяет действительную пору сложного строения идеальной цилиндрической, при этом длина поры равна ребру основного ромбоэдра, а не его высоте. Длина такого прямолинейного канала, заменяющего криволинейный канал равна:

$$l_k = 1,065 \cdot d_k \quad (2.66)$$

а при $\theta = 90^\circ$:

$$l_k = d_k \quad (2.67)$$

при условии $60^\circ < \theta < 90^\circ$:

$$l_k = d_k \cdot \left(1,195 - 0,39 \frac{\theta}{\pi}\right) \quad (2.68)$$

Формула длины криволинейного канала СГП с учетом (2.66, 2.67) соотношения объема каналов в СГП двух форм по Слихтеру («ромб» – 30%, «треугольник» – 70%) имеет вид:

$$l_k = 2 \cdot d \cdot N \cdot \varepsilon_1 + (d_k + d_k \cdot 0.877) \cdot 1,065 \cdot N \cdot \varepsilon_2 \quad (2.69)$$

где N – количество криволинейных отрезков канала, образованного из 8 гранул, ед; ε_1 – объемное число каналов формы «ромб»; ε_2 – объемное число каналов формы «треугольник», d_{ep} – средний эквивалентный диаметр гранул пеностекла, мм (1-4 – 0,28; 5-7 – 0,61; 10-15 – 1,28; 20-30 – 2,17), при этом общая длина СГП составит:

$$L = 2 \cdot d_{ep} \cdot N \cdot \varepsilon_1 + (d + d \cdot 0.877) \cdot N \cdot \varepsilon_2 \quad (2.70)$$

Зависимость длины криволинейного канала СГП l_k , высоты СГП H от количества криволинейных отрезков канала, образованного из 8 гранул представлена на Рисунке 2.11.

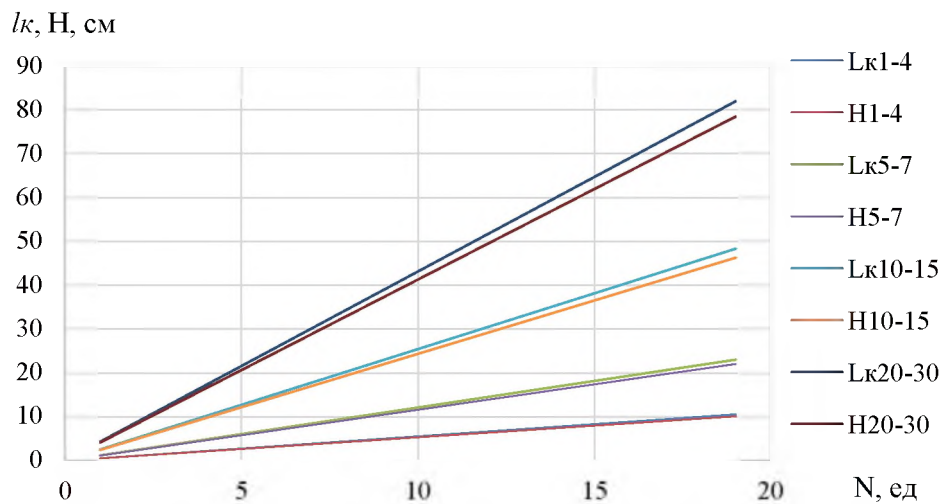


Рисунок 2.11 – Зависимость длины криволинейного канала СГП, высоты от количества криволинейных отрезков канала, образованного из 8 гранул

Одним из важных геометрических параметров в теории фильтрации жидкостей и газов является эквивалентный диаметр криволинейного канала. Слихтер рассматривал две формы сечения каналов в пористой среде «треугольник» при более плотном расположении шаров и «ромб», рис. 2.6. В ромбическом канале формула для определения эквивалентного диаметра канала имеет вид:

$$d_k = d \sqrt{\frac{2\sqrt{3}}{\pi} - 1} \quad (2.71)$$

в треугольном канале:

$$d_{\kappa} = 2 \cdot d \sqrt{\frac{0,0038}{\pi}} \quad (2.72)$$

где d – диаметр шара (гранулы), мм.

Консейсао А.А. да в работах [66,67,87] исследовал испарение нефти и нефтепродуктов с поверхности различных сорбентов, в которых определил геометрические формы каналов и эквивалентные диаметры каналов сорбентов для сбора нефти, Рисунок 2.12.

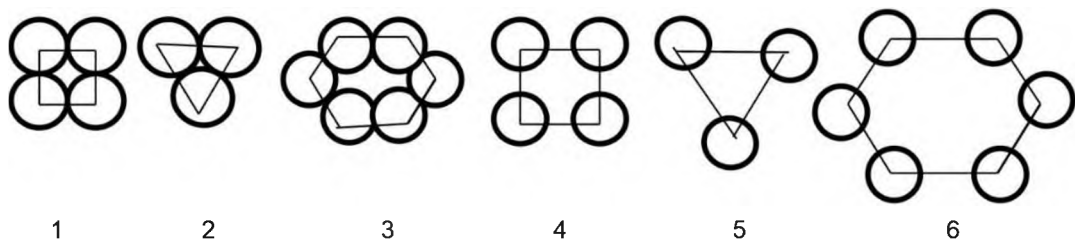


Рисунок 2.12 – Геометрические формы каналов в пористой среде сорбентов

В зависимости от типа размещения гранул каналы образуют 6 форм: при уплотненной засыпке (1-3); при свободной засыпке (4-6).

При плотном размещении сорбента, эквивалентный диаметр канала в конфигурации «ромб» определяется по формуле:

$$d_{\kappa} = \frac{(4 - \pi) \cdot d}{\pi} \quad (2.73)$$

Эквивалентный диаметр канала в конфигурации «треугольник» определяется по формуле:

$$d_{\kappa} = \frac{2 \cdot d \cdot \left(\sqrt{3} - \frac{\pi}{2} \right)}{\pi} \quad (2.74)$$

Эквивалентный диаметр канала в конфигурации «шестигранник» определяется по формуле:

$$d_{\kappa} = \frac{d \cdot (3\sqrt{3} - \pi)}{2 \cdot \pi} \quad (2.75)$$

Результаты оценки эквивалентного диаметра канала СГП сведены в Таблицу 2.3.

Таблица 2.3 – Эквивалентный диаметр канала d_k

d_{ep} , мм	По Консейсао			По Сликтеру	
	«Ромб» 30%	«Треугольник» 67%	«Шестигранник» 3%	«Ромб» 33%	«Треугольник» 67%
1	0,27	0,10	0,33	0,32	0,22
2	0,55	0,21	0,65	0,64	0,44
3	0,82	0,31	0,98	0,96	0,66
4	1,09	0,41	1,31	1,28	0,88
5	1,37	0,51	1,64	1,60	1,10
6	1,64	0,62	1,96	1,92	1,32
7	1,91	0,72	2,29	2,24	1,54
8	2,19	0,82	2,62	2,56	1,76
9	2,46	0,92	2,94	2,88	1,98
10	2,73	1,03	3,27	3,20	2,20
11	3,01	1,13	3,60	3,52	2,42
12	3,28	1,23	3,92	3,85	2,64
13	3,55	1,34	4,25	4,17	2,86
14	3,83	1,44	4,58	4,49	3,08
15	4,10	1,54	4,91	4,81	3,30
16	4,37	1,64	5,23	5,13	3,52
17	4,65	1,75	5,56	5,45	3,74
18	4,92	1,85	5,89	5,77	3,96
19	5,19	1,95	6,21	6,09	4,18
20	5,47	2,05	6,54	6,41	4,40
21	5,74	2,16	6,87	6,73	4,62
22	6,01	2,26	7,19	7,05	4,84
23	6,29	2,36	7,52	7,37	5,06
24	6,56	2,46	7,85	7,69	5,28
25	6,83	2,57	8,18	8,01	5,50
26	7,10	2,67	8,50	8,33	5,72
27	7,38	2,77	8,83	8,65	5,94
28	7,65	2,87	9,16	8,97	6,16
29	7,92	2,98	9,48	9,29	6,38
30	8,20	3,08	9,81	9,61	6,60

Средний эквивалентный диаметр канала для СГП фракции Ф5-7 можно определить по формуле:

$$\bar{d}_k = \sum_{i=1}^n \frac{(d_{i1} + d_{i2} + d_{i3}) \cdot \varepsilon_i}{n} \quad (2.76)$$

где d_{i1} , d_{i2} , d_{i3} – диаметры гранул равные 5, 6 и 7 мм соответственно одной формы канала, мм; n – количество форм каналов, ед; ε_i – количество каналов одной формы от общего числа каналов, %:

$$\varepsilon_i = \frac{\sum_{i=1}^b N_i}{b} \cdot 100 \quad (2.77)$$

где N_i – количество каналов одной формы из одного образца СГП, ед; N_j – среднее количество каналов в одном образце СГП, ед; b – количество экспериментальных образцов одного слоя гранул, $b = 5$ ед.

Зависимость среднего эквивалентного диаметра канала гранулированного пеностекла \bar{d}_3 , для четырех фракций пеностекла представлена на Рисунке 2.13.

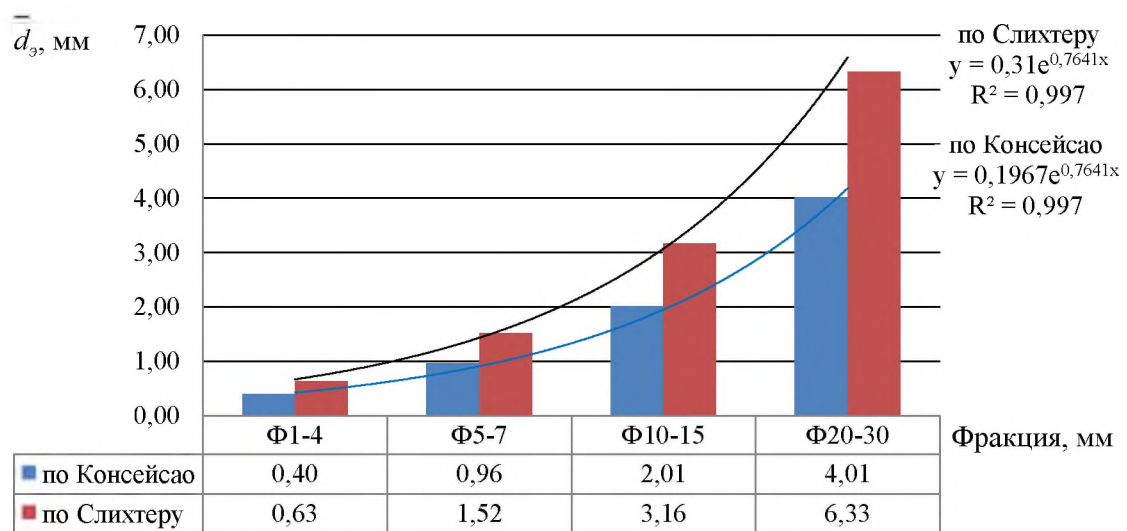
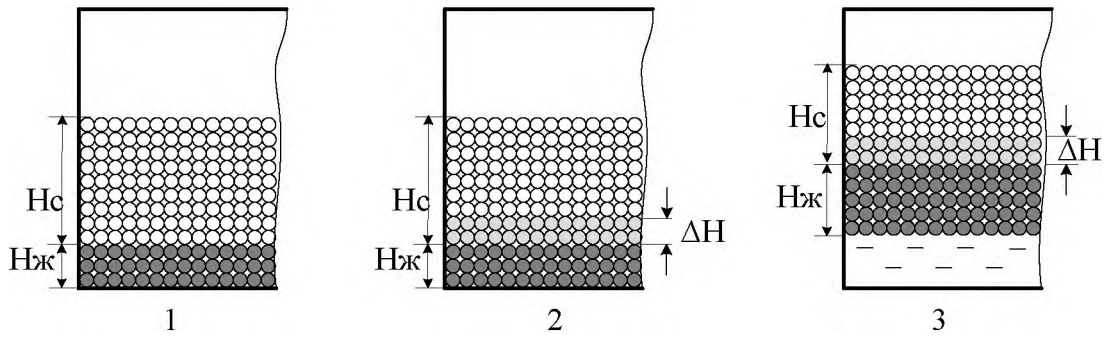


Рисунок - 2.13 Распределение среднего эквивалентного диаметра канала

2.6 Оценка равновесной высоты слоя гранулированного пеностекла

Равновесное состояние слоя гранулированного пеностекла достигается при условии, когда уровень разлива жидкости достигает определенного значения, при котором СГП отрывается от дна емкости под действием архимедовой силы. При этом высота «сухого» СГП изменяется в зависимости от насыпной плотности гранул пеностекла. Схема изменения уровня жидкости и СГП при разливе жидкости приведена на Рисунке 2.14.



H_c – высота «сухого» слоя; $H_{ж}$ – высота подъема уровня жидкости;
 ΔH – высота смоченного слоя.

Рисунок 2.14 – Изменения уровня жидкости и СГП при проливе жидкости

Положение 1 (рис. 2.14) – нижняя часть СГП находится в жидкости, положение 2 – уровень жидкости поднимается и смачивается прилегающей слой гранул на высоту ΔH за счет действия капиллярных сил, положение 3 – критический подъем уровня жидкости, при котором СГП переходит в равновесное состояние.

Определим равновесную высоту «сухого» СГП, которая формируется над поверхностью жидкости. Силу Архимеда, действующую на весь объем СГП можно описать равенством:

$$\rho_{ж} \cdot g \cdot V_{зп} = \rho_{ж} \cdot g \cdot S \cdot h \cdot (1 - m) \quad (2.78)$$

где $h = H - H_c$ высота СГП, погруженного в жидкость, м, а

$S \cdot h \cdot (1 - m) = V_{зп}$ – объем, занимаемый гранулами в СГП, м³; $\rho_{ж}$ – плотность жидкости, кг/м³; g – ускорение свободного падения, м/с²; S – площадь сечения слоя СГП, м².

Слой СГП, погруженный в жидкость уравновешен силой тяжести:

$$M \cdot g = \rho_z \cdot g \cdot H \cdot S \quad (2.79)$$

где M – общая масса СГП, кг; ρ_z – насыпная плотность гранул СГП, кг/м³;

тогда подставив в (2.78) выражение (2.79) получим:

$$\rho_z \cdot g \cdot H \cdot S = \rho_{ж} \cdot g \cdot S \cdot (H - H_c) \cdot (1 - m) \quad (2.80)$$

преобразуя (2.80) получится:

$$H \cdot (\rho_{ж} \cdot (1 - m) - \rho_z) = \rho_{ж} \cdot H_c \cdot (1 - m) \quad (2.81)$$

после преобразований (2.81) выразим высоту «сухого» СГП:

$$H_c = \frac{\rho_{жс} \cdot (1-m) - \rho_2}{\rho_{жс} \cdot (1-m)} = 1 - \frac{\rho_2}{\rho_{жс} \cdot (1-m)} \cdot H \quad (2.82)$$

В Таблицу 2.4 сведены результаты расчета высоты «сухого» СГП, полученной по формуле (2.43) при общей высоте СГП $H = 10$ см и $H = 15$ см.

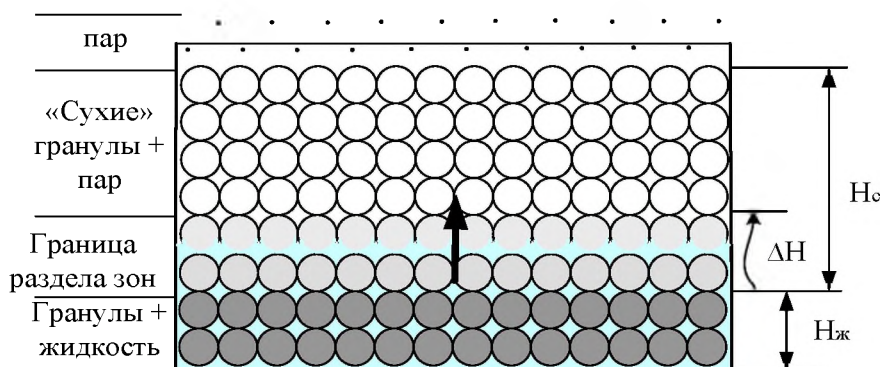
Таблица 2.4 – Высота «сухого» СГП при общей высоте СГП

Вещество	$\rho_{жс}$, кг/м ³	Высота сухого слоя H_c , см							
		Ф1-4		Ф5-7		Ф10-15		Ф20-30	
		$H=10$	$H=15$	$H=10$	$H=15$	$H=10$	$H=15$	$H_c=10$	$H=15$
гексан	654	4,0	6,0	5,0	7,5	5,5	8,2	6,1	9,2
бензин	731	4,6	6,9	5,6	8,3	6,0	8,9	6,5	9,8
керосин	781	5,0	7,4	5,8	8,8	6,2	9,3	6,7	10,1
этанол	785	5,0	7,5	5,9	8,8	6,2	9,4	6,8	10,1
ацетон	790	5,1	7,5	5,9	8,8	6,3	9,4	6,8	10,2
ДТ	840	5,3	8,0	6,1	9,2	6,5	9,7	7,0	10,5

Примечание: гексан (н-гексан) [77]; бензин – (бензина АИ-92) [76]; керосин (керосин авиац.) [80]; этанол (спирт этиловый) [78]; ацетон [81]; ДТ (дизельное топливо) [79].

2.7 Оценка смачиваемости и капиллярного поднятия при проливах углеводородных жидкостей на гранулированный слой пеностекла

Систему «СГП – жидкость» условно можно разделить на три зоны: СГП в жидкости, $H_{ж}$; смоченная часть СГП, $H_{см}$; «сухой» СГП, H_c , Рисунок 2.15.



H_c – высота «сухого» слоя; $H_{ж}$ – высота слоя гранул в жидкости;

ΔH – высота смоченных гранул.

Рисунок 2.15 – Схема зон СГП в условиях пролива жидкости

Между слоем гранул, погруженным в жидкость, и «сухим» слоем находится граница раздела зон, высота которой растет со временем под действием капиллярных сил, относительно, небольшой сорбционной активности гранулированного пеностекла [62, 68, 97]. Процесс капиллярного движения жидкости в пористых средах достаточно подробно описан в работах [69-73, 88].

Высота подъема уровня жидкости в пористой среде под действием капиллярных сил зависит от физических свойств жидкости и от эквивалентного диаметра криволинейных каналов. Чем мельче размер гранул, тем выше подъем уровня жидкости в СГП. поэтому больший расход ЛВЖ, наблюдается при горении на СГП из мелкого песка [86].

Изменение высоты капиллярного поднятия во времени имеет экспоненциальную зависимость, при этом можно определить максимальную высоту подъема жидкости по прямым вертикальным капиллярам по формуле Жюрена [72]:

$$h_{\text{кп}} = \frac{2 \cdot \sigma \cdot \cos \theta}{g \cdot \rho \cdot r} \quad (2.83)$$

где σ – поверхностное натяжение, мН/м; θ – угол смачивания; r – средний радиус пор (капилляров), м; ρ – плотность жидкости кг/м³; g – ускорение свободного падения, м/с².

Для криволинейных вертикальных каналов определить теоретическую высоту подъема нефти и нефтепродуктов h_k можно по формуле, предложенной Самойловым Н.А., Консейсао А.А.-да [88]:

$$h_k = \frac{2 \cdot \sigma}{g \cdot \rho \cdot \bar{d}_k} \quad (2.84)$$

где \bar{d}_k – средний эквивалентный диаметр канала, м.

Физические параметры исследуемых углеводородных жидкостей для оценки высоты капиллярного подъема сведены в Таблицу 2.5.

Таблица 2.5 – Физические показатели исследуемых жидкостей

№ п/п	вещество	$\rho_{ж}$, кг/м ³	σ , мН/м
1	гексан	654	18,3
2	этанол	785	22,1
3	бензин	729	21,0
4	ацетон	790	23,7
5	керосин	781	24,0
6	диз. топливо	840	29,8

Результаты оценки высоты капиллярного подъема h_k по формуле (2.84) и ее зависимость от поверхностного натяжения углеводородных жидкостей представлены на Рисунках 2.16, 2.17.

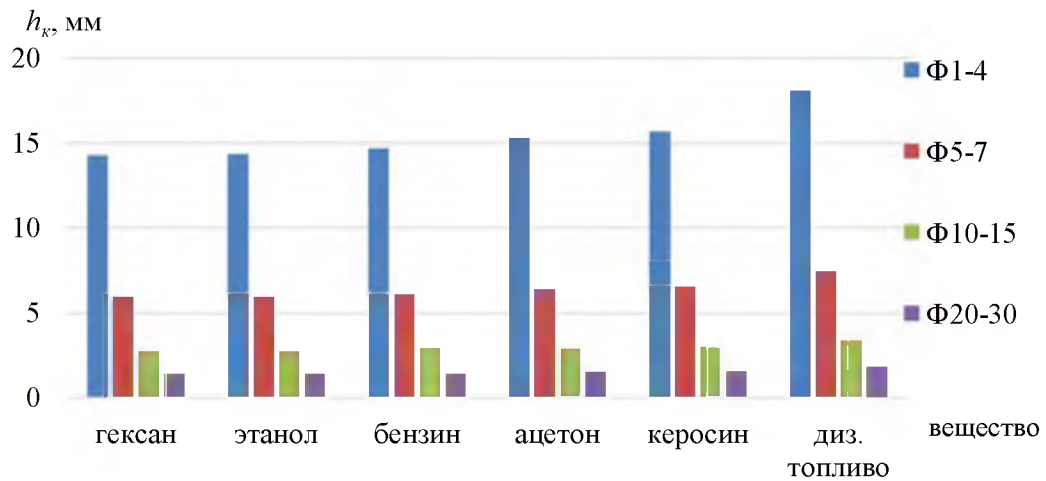


Рисунок 2.16 – Высота капиллярного подъема уровня жидкости для различных фракций пеностекла

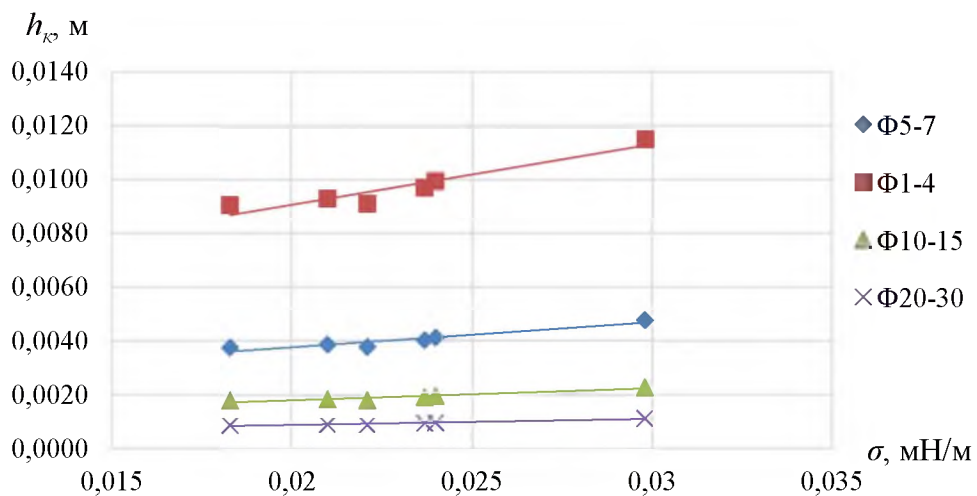


Рисунок 2.17 Зависимость высоты капиллярного подъема уровня от поверхностного натяжения жидкостей

Максимальный капиллярный подъем ЛВЖ у фракции Φ 1-4 (рис. 2.16), при этом высота «сухого» слоя снизится $>30\%$ (по данным Таблицы 2.5 H_c). Для остальных фракций СГП снижение параметра H_c не значительное.

Высота «сухого» СГП с учетом капиллярного подъема уровня жидкости и формулы (2.82) будет иметь вид:

$$H_c = \left(\left(1 - \frac{\rho_c}{\rho_{жс} \cdot (1-m)} \right) \cdot H \right) - h_w \quad (2.85)$$

Для оценки H_c были проведены эксперименты с различными ЛВЖ в емкости ($d = 15$ см) с СГП. Четыре фракции СГП (Φ 1-4; Φ 5-7; Φ 10-15 и Φ 20-30 мм) высотой от 7,5 см до 22,5 см (с шагом 1,5) размещались в прозрачных стеклянных емкостях, затем наливалась ЛВЖ объемом, при котором СГП переходит в равновесное состояние, затем измерялась высота «сухого» слоя H_c линейкой с делением 1 мм в течение 1 часа. Пример расположения СГП марки «Термоизол» представлен на Рисунке 2.18.

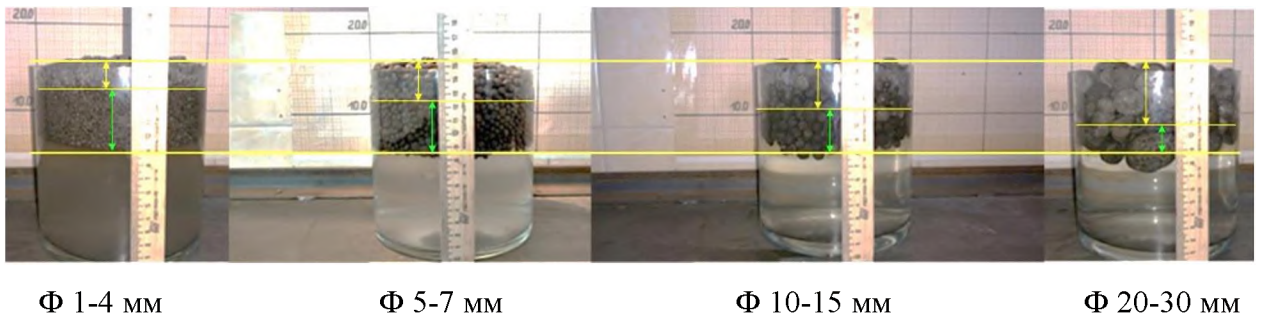


Рисунок 2.18 – Положение СГП в емкости с ЛВЖ

Результаты оценки H_c по формуле (2.85) представлены в Таблицах 2.6 и 2.7. Зависимости высоты «сухого» слоя H_c от плотности жидкости $\rho_{ж}$ для СГП толщиной 10 см и 15 см с учетом капиллярного подъема уровня жидкости представлены на Рисунках 2.19, 2.20.

Таблица 2.6 – Высота «сухого» слоя H_c для СГП толщиной 15 см с учетом капиллярного подъема

Вещество	$\rho_{ж}$, кг/м ³	Высота «сухого» слоя H_c , см							
		Ф1-4		Ф5-7		Ф10-15		Ф20-30	
		Расчет	Э-т	Расчет	Э-т	Расчет	Э-т	Расчет	Э-т
н-гексан	654	4,5	4,3	6,9	7,0	7,9	8,0	9,0	9,0
бензин	731	5,4	5,3	7,7	7,6	8,6	8,3	9,6	9,5
керосин	781	5,8	5,8	8,1	8,0	9,0	8,8	10,0	9,8
этанол	785	6,0	6,1	8,2	8,3	9,1	9,0	10,0	10,2
ацетон	790	5,9	5,9	8,2	8,2	9,1	9,2	10,0	10,0
диз. топливо	840	6,1	6,2	8,4	8,5	9,4	9,3	10,3	10,5

Примечание: Э-т – эксперимент.

Таблица 2.7 – Высота «сухого» слоя H_c для СГП толщиной 10 см с учетом капиллярного подъема

Вещество	$\rho_{ж}$, кг/м ³	Высота «сухого» слоя H_c , см							
		Ф1-4		Ф5-7		Ф10-15		Ф20-30	
		Расчет	Э-т	Расче т	Э-т	Расчет	Э-т	Расчет	Э-т
н-гексан	654	2,5	2,3	4,4	4,4	5,2	5,2	6,0	6,0
бензин	731	3,1	2,9	4,9	4,7	5,7	5,5	6,4	6,2
керосин	781	3,3	3,2	5,2	5,1	5,9	5,8	6,6	6,5
этанол	785	3,5	3,5	5,2	5,3	5,9	6,0	6,6	6,5
ацетон	790	3,5	3,5	5,2	5,4	5,9	6,0	6,6	6,5
диз. топливо	840	3,4	3,6	5,3	5,5	6,1	6,1	6,8	6,7

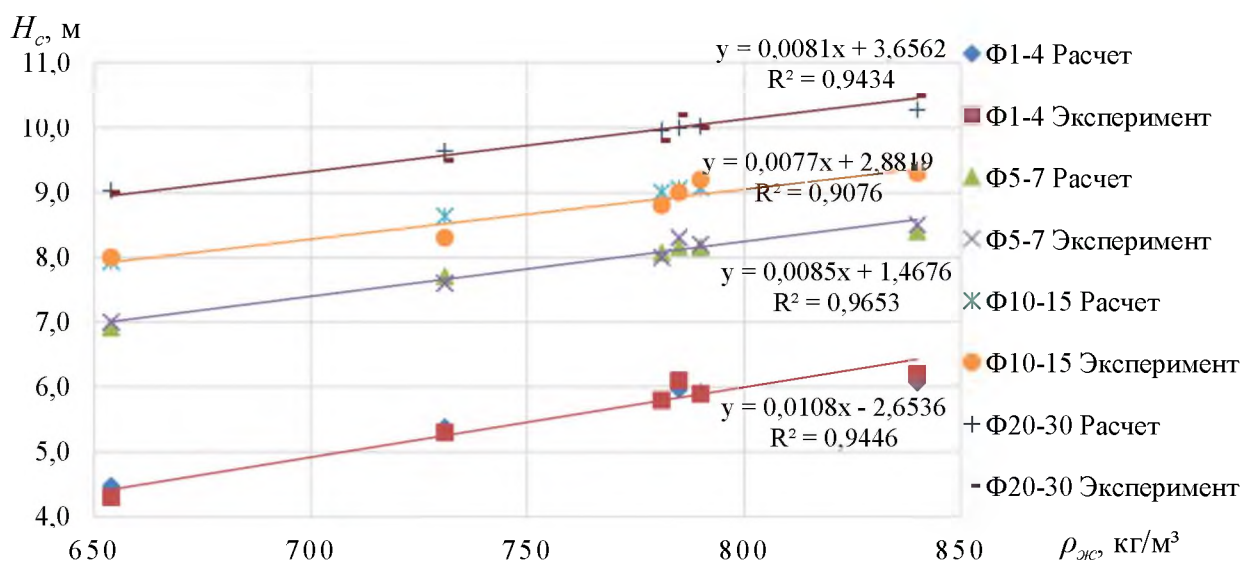


Рисунок 2.19 – Зависимость высоты «сухого» слоя от плотности жидкости для СГП толщиной 15 см с учетом капиллярного подъема

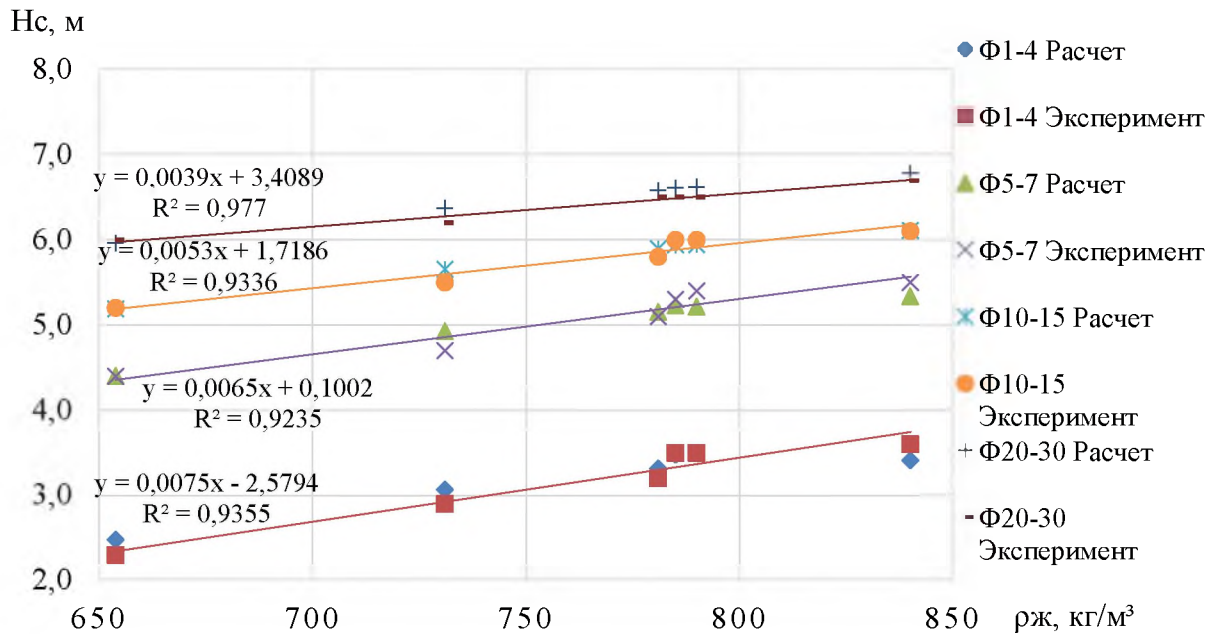


Рисунок 2.20 – Зависимость высоты «сухого» слоя от плотности жидкости для СГП толщиной 10 см с учетом капиллярного подъема

На графиках (Рисунки 2.18, 2.19) видно, что у фракции 1-4 мм самая низкая высота H_c по отношению к общей высоте СГП H . Капиллярный подъем уровня жидкости происходит в первые 5 минут с момента пролива жидкости. Результаты расчета и эксперимента имеют хорошую сходимость и выражаются линейной зависимостью с коэффициентом детерминации R^2 не менее 0,9.

Эксперимент по определению высоты капиллярного поднятия показал, что в процессе подъема уровня жидкости происходит смачивание жидкостью гранул пеностекла, находящихся выше уровня жидкости.

Изменение уровня смачивания СГП углеводородной жидкостью $H_{см}$ в течение времени τ характеризуется логарифмической зависимостью, интенсивный рост параметра $H_{см}$ происходит в первые 900 секунд с момента пролива жидкости, затем значительно замедляется [97]. На Рисунке 2.21 представлена динамика смачивания СГП Φ5-7 различными ЛВЖ.

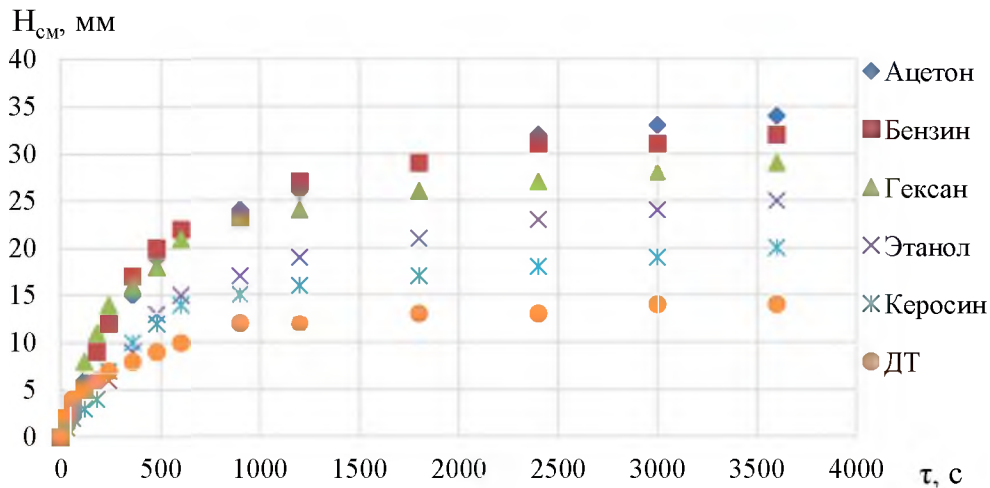


Рисунок 2.21 – Изменение уровня смачивания различными ЛВЖ во времени

2.8 Модель испарения углеводородных жидкостей при экранировании поверхности пролива гранулированным слоем пеностекла

Граничными условиями модели испарения углеводородной жидкости через СГП являются:

- пористая среда корпускулярная, т.к. гранулы по форме близки к сферическим, при этом – изотропной, т.к. свойства СГП каждой фракции одинаковы во всех направлениях, а отношение максимального диаметра гранул к наименьшему не более 2;

- на границе пористой среды СГП с жёсткой стенкой, проницаемость равна нулю, при этом условие можно записать в виде: $v \cdot n = 0$,

где v – скорость потока, а n – вектор нормали к границе;

- на границе СГП и углеводородной жидкости условия сохранения потока массы и непрерывности давления можно записать в виде: $[\rho \cdot v_n]; [p] = 0$,

где ρ - плотность среды; p - давление; квадратными скобками обозначен скачок при переходе через границу, то есть разность значений величины в скобках слева и справа от границы;

- граница раздела двух сред (жидкости и пара) в пористой среде является поверхностью разрыва, на которой условия сохранения потока массы и непрерывности давления: $[\rho(m \cdot w - v_n)] = 0$, где $[p] = 0$

где m – пористость; w – скорость поверхности разрыва по нормали к ней;

- на границе пористой среды, погруженной в жидкость и «сухого» СГП с нормальным давлением, в отсутствие поверхностного натяжения, давление считается непрерывным, а проекция скорости фильтрации на внешнюю нормаль к границе – положительной: $v \cdot n > 0$, то есть жидкость может только вытекать (высачиваться) из пористой среды;

- при капиллярном поднятии углеводородной жидкости на границе «сухого» СГП и СГП в жидкости условия непрерывности давления и нормальной составляющей скорости [108]: $[p] = 0$; $[v_n] = 0$;

- процесс испарения при отсутствии подъема уровня жидкости относится к однофазной фильтрации;

- скорость испарения в пристеночной области не превышает скорость испарения близкой к центральной оси горизонтальной проекции емкости $u_p = v_n = const$ [109].

Снижение скорости горения жидкостей при экранировании поверхности пролива СГП связано со снижением диффузии пара в зону горения. Пористый слой СГП, расположенный поверх уровня жидкости («сухой» слой), разбивает объем пара на многочисленные криволинейные струйки [129]. С увеличением высоты «сухого» пористого слоя растет отрезок пути, на котором оказывается сопротивление движению пара и скорость испарения снижается. Сопротивление движению пара на отрезке длины криволинейного канала «сухого» СГП можно выразить через критерий экранирования или коэффициент экранирования k_e . При критических значениях k_e достигается эффект прекращения горения.

В криволинейном канале молекулы пара встречают сопротивление о стенки, поэтому зависимость снижения скорости потока пара с поверхности жидкости в «сухом» пористом слое СГП можно представить в виде:

$$\Delta v \sim -k_3 \cdot v \cdot \Delta l \quad (2.86)$$

где k_3 – коэффициент экранирования, который зависит от геометрических параметров и физических свойств СГП, физико-химических свойств горючей жидкости; v – массовая скорость испарения жидкости, г/с; Δl – длина участка канала, м.

Допустим, массовая скорость испарения жидкости, пары которой прошли зону экранирования СГП, в точке с координатой x и толщиной dx равна $-dv$. Эта величина пропорциональна массовой скорости паров жидкости, дошедших точки x и толщине СГП – dx :

$$dv = -k_3 \cdot v_0 \cdot dx \quad (2.87)$$

Плотность потока молекул пара можно представить в виде:

$$j = \rho \cdot v \cdot S \quad (2.88)$$

где ρ – плотность пара, кг/м³; v – скорость движения молекул пара, м/с; S – площадь поверхности испарения, м².

Интегрируя выражение (2.87) получим:

$$v(H_c) = v_0 \cdot \exp(-k_3 \cdot H_c) \quad (2.89)$$

где v_0 – массовая скорость испарения жидкости без экрана СГП, г/с;

H_c – высота «сухого» СГП, м.

Из выражения (2.87) следует:

$$\ln\left(\frac{v}{v_0}\right) = -k_3 \cdot H_c \quad (2.90)$$

тогда коэффициент экранирования:

$$k_3 = \frac{1}{H_c} \cdot \ln\left(\frac{v}{v_0}\right) \quad (2.91)$$

Квазиизотермическая модель испарения жидкостей

В процессе испарения жидкости сначала переходят в пар наиболее быстрые молекулы (компоненты), обладающие большей средней кинетической энергией, чем молекулы, остающиеся в жидкости. Если испаряющаяся жидкость теплоизолирована, то ее температура будет

понижаться. Чтобы температура испаряющейся жидкости не понижалась, к ней необходимо подводить тепло. Количество тепла, необходимое для испарения единицы массы жидкости без изменения ее температуры при внешнем давлении равном давлению насыщенных паров, называется скрытой теплотой испарения.

Скрытая теплота испарения L является функцией температуры, давления и геометрии поверхности (например, площади свободной поверхности). То есть величину L можно считать функцией температуры, давления и некоторого параметра F : $L(T, P, F)$

При испарении жидкости массой Δm за дифференциально-малый промежуток времени Δt происходит отток тепла от жидкости, что приводит к понижению температуры в подповерхностных слоях жидкости ΔT .

Тепло, которое унесла испарившаяся часть жидкости, можно найти по формуле:

$$\Delta Q_u = -L \cdot \Delta m \quad (2.92)$$

Понижение температуры, в свою очередь, влечет за собой подток тепла от границы пара и от нижерасположенного слоя жидкости. Размер такой области небольшой, но пропорционален массе жидкости. Для прогрева такого слоя на температуру ΔT нужно подвести тепло:

$$\Delta Q_n = c \cdot k \cdot m(t) \cdot \Delta T \quad (2.93)$$

где c – теплоемкость жидкости, Дж/(кг·°C); $m(t)$ – масса оставшейся части жидкости, г; $k < 1$ – коэффициент, отвечающий за величину той части жидкости, которая должна прогреться на ΔT .

В квазистационарном случае при $\Delta Q_u = \Delta Q_n$:

$$-L(T, P)\Delta m = c \cdot k \cdot m(t) \cdot \Delta T \quad (2.94)$$

Учитывая, что процесс происходит во времени, за промежуток Δt , представим формулу (2.94) в таком виде:

$$-L \frac{\Delta m}{\Delta t} = c \cdot k \cdot m(t) \cdot \frac{\Delta T}{\Delta t} \quad (2.95)$$

Процесс изменения температуры со временем носит слабо колебательный характер, тогда можно считать, что:

$$\alpha = \frac{\Delta T}{\Delta t} \quad (2.96)$$

α - медленно меняющаяся со временем функция, вблизи равновесных значений температуры T_0 , которую можно считать константой.

Переходя к дифференциальным значениям, получим:

$$-L \frac{\Delta m}{\Delta t} = c \cdot k \cdot m(t) \cdot \frac{\Delta T}{\Delta t} \quad (2.97)$$

Разделяя переменные, имеем:

$$\frac{dm}{m} = -\frac{c \cdot k \cdot \alpha}{L} dt \quad (2.98)$$

С учетом начальных условий: $t=0: m(0) = m_0$

Это уравнение, после интегрирования, будет иметь вид:

$$m(t) = m_0 \cdot \exp(-\beta t) \quad (2.99)$$

где $\beta = \frac{c \cdot k \cdot \alpha}{L}$ является коэффициентом летучести молекул жидкости.

Если представить процесс испарения через скорость испаряющейся жидкости $\frac{dm}{dt}$, тогда:

$$\frac{dm}{dt} = -\beta \cdot m_0 \cdot \exp(-\beta t) \quad (2.100)$$

В испаряющейся жидкости (например, в нефтепродуктах: бензине, керосине) могут присутствовать разные по летучести компоненты, у каждой из которых свое значение показателя β .

Если коэффициент летучести какого-то из компонентов мал настолько, что для некоторого ограничивающего процесс испарения времени βt оказывается малым, то, разлагая $\exp(-\beta t)$ в ряд Тейлора с центром в нуле, получим:

$$m(t) = m_0 \cdot (1 - \beta t) \quad (2.101)$$

Зависимость получается практически линейной по времени. Тогда скорость испарения будет иметь более простой вид:

$$\frac{dm}{dt} = -\beta \cdot m_0 \quad (2.102)$$

Таким образом, для компонента смеси, имеющих низкие значения коэффициента летучести, скорость испарения будет постоянно малой.

Если в испаряющейся жидкости присутствуют два компонента, у которых коэффициенты летучести β различаются значительно, например, $\beta_1 \gg \beta_2$, то в данном случае динамика испарения будет такой:

вначале будет происходить интенсивное испарение быстро летучей компоненты (β_1), а затем менее летучей (β_2). Это можно выразить в виде формулы:

$$m(t) = \begin{cases} m_0 \cdot \exp(-\beta_1 t), \text{ для } 0 < t \leq \frac{1}{\beta_1} = \tau_1 \\ \frac{m_0}{e} \cdot \exp(-\beta_2(t - \tau_1)), \text{ для } t > \tau_1 \end{cases} \quad (2.103)$$

где $e \approx 2,72$ основание натурального логарифма,

$\tau_1 = \frac{1}{\beta_1}$ характерное время испарения высоколетучего соединения.

Если считать, что второе соединение (основной компонент горючей смеси) слаболетучее, то можно упростить представление закономерностей потери массы жидкости:

$$m(t) = \begin{cases} m_0 \cdot \exp(-\beta_1 t), \text{ для } 0 < t \leq \frac{1}{\beta_1} = \tau_1 \\ \frac{m_0}{e} \cdot (1 - \beta_2(t - \tau_1)), \text{ для } t > \tau_1 \end{cases} \quad (2.104)$$

Экспериментальное исследование такой модели, потребует выполнить простой эксперимент по изменению массы испаряющейся жидкости:

$$m(t) = m_0 \cdot \exp(-\beta t) \quad (2.105)$$

прологарифмировав, получим:

$$\text{Ln} \frac{m(t)}{m_0} = -\beta t \quad (2.106)$$

Удобнее представить в виде:

$$\text{Ln} \frac{m_0}{m(t)} = \beta t \quad (2.107)$$

Для каждой ЛВЖ и площади ее поверхности испарения при определенных внешних условиях (давление, температура, влажность окружающей среды) можно построить график зависимости $\ln \frac{m_0}{m(t)}$ от времени t , сглаживая прямой зависимость по тангенсу угла наклона к оси времени легко определить коэффициент летучести β .

Для двухкомпонентных летучестей на графике распределение зависимости $\ln(m_0/m(t))$ от времени τ будет «изломом», Рисунок 2.22:

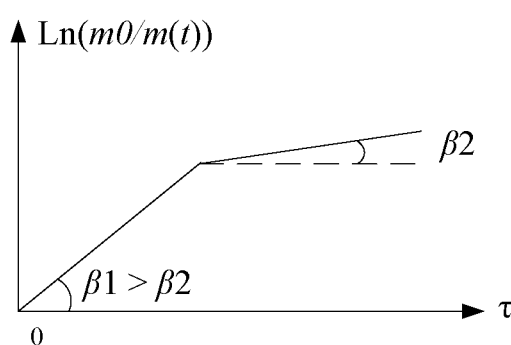


Рисунок 2.22 – Изменение коэффициента летучести при испарении двухкомпонентной жидкости

Следует отметить, что для слаболетучих компонентов жидкостей, в соответствии с формулой (2.105), логарифмические масштабы на оси ординат (Рисунок 2.22) можно заменить линейными.

ГЛАВА 3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭКРАНИРОВАНИЯ ИСПАРЕНИЯ И ГОРЕНИЯ УГЛЕВОДОРОДНЫХ ЖИДКОСТЕЙ ГРАНУЛИРОВАННЫМ СЛОЕМ ПЕНОСТЕКЛА

3.1 Граничные условия проведения эксперимента

Исходные данные для разработки методики определения геометрических параметров СПП, при которых существенно снижается интенсивность испарения углеводородных жидкостей и достигается эффект гашения пламени, были приняты на основании данных литературного обзора и анализа пожарной опасности аварийных утечек горючих жидкостей.

Площадь локальных утечек углеводородных жидкостей не превышает $2,5 \text{ м}^2$ в пределах площадки, ограниченной бортиками, поддонами.

Технологические трубопроводы, сливно-наливные патрубки цистерн, пробоотборники, как правило, располагаются на высоте $0,2 - 1 \text{ м}$ от уровня земли. Истечение жидкости через патрубки, разъемные соединения происходит самотеком или в виде капельной утечки. Высота поддона для сбора локальных проливов ЛВЖ не должна быть менее расчетной общей высоты СПП.

Отсутствие воздушного потока над поверхностью пролива, приближенность к штилю будет являться наихудшими условиями для развития пожароопасной ситуации при локальном аварийном проливе углеводородных жидкостей. В связи с этим лабораторные эксперименты должны проводиться в условиях отсутствия подвижности воздушной среды, а полигонные в условиях приближенности к штилю.

Лимитированное время испарения ЛВЖ в экспериментах было принято равным 15 мин. Значительная масса паров образуется в первые минуты испарения, при этом интенсивность испарения со временем снижается.

Исследованию подлежала эффективность гашения пламени углеводородных жидкостей в емкостях (поддонах) с минимальной высотой «сухого» СГП в условиях равновесного положения СГП (при всплытии слоя).

Исследование снижения пожарной опасности аварийных проливов углеводородных жидкостей ограничено применением подложек из гранулированного пеностекла исходя из следующих особенностей:

- объем локального пролива ЛВЖ не должен превышать объем поддона с СГП в равновесном состоянии, при этом высота «сухого» СГП должна обеспечивать гашение пламени ЛВЖ, а верхний уровень гранулированного пеностекла должен быть на 1 см ниже кромки поддона;

- в работе рассматривались наиболее распространенные фракции пеностекла: Φ 1-4 мм; Φ 5-7 мм; Φ 10-15 мм; Φ 20-30 мм;

- толщина слоя не должна превышать 25 см ввиду ограничения по высоте поддонов и экономии гранулированного материала;

- насыпная плотность гранулированного материала (пеностекла) не должна превышать 250 кг/м^3 для образования достаточного большого «сухого» СГП, при котором достигается эффект гашения пламени в условиях равновесного состояния СГП;

- нарушение целостности гранул пеностекла при испытании СГП не должны превышать 5 % от общего объема;

- стойкость гранулированного пеностекла к агрессивным средам, веществам, а также к различным нагрузкам, и способам утилизации в работе не рассматривалась в виду необходимости проведения большого объема исследований и имеющейся базы данных в этом направлении;

- стойкость СГП к температурным нагрузкам, свойственным при горении пролива углеводородных жидкостей в слоях ниже паровой фазы горения.

3.2 Лабораторные исследования параметров испарения углеводородных жидкостей

Для оценки влияния высоты слоя гранулированного пеностекла на параметры испарения углеводородных жидкостей (массы, скорости испарения, интенсивности испарения) использовался гравиметрический метод анализа, основанный на точном измерении потери массы паров горючих жидкостей.

Применяемые приборы, лабораторная посуда, горючие жидкости

Аналитические весы *GR-300* с ценой деления 0,0001 г, класс точности по ГОСТ OIML R 76-1-2011 – I, габаритные размеры, мм 327 × 249 × 330 мм.

Стакан (цилиндр) мерный вместимостью 100 см³ по ГОСТ 25336 [74] для измерения объема углеводородной жидкости.

Химически-стойкие полипропиленовые емкости диаметром 115 мм, с толщиной стенки 2,0 мм [75] для размещения гранулированной подложки на аналитических весах. Высота стенок цилиндров соответствовала высоте гранулированных подложек с шагом 1,5 см.

Гранулированное пеностекло марки «Термоизол» фракции 1-4 мм, 5-7 мм, 10-15 мм; 20-30 мм ТУ 5914-001-15068529 [62].

Термоанемометр *TESTO 425* с разрешением 0,1°C (±0,5) и скорости воздушного потока 0,01 м/с (± 0,03).

Шприц стеклянный медицинский по ГОСТ 22967-90 [82] для налива горючей жидкости в цилиндрическую емкость под слой гранулированной подложки.

Секундомер *TORRES SW-002* с точностью измерения 0,01 с.

Горючие жидкости выбирались из различных классов углеводородных жидкостей: ацетон (насыщенные кетоны); н-гексан (алканы); этиловый спирт (спирты); бензин, керосин, дизельное топливо (нефтепродукты), Таблица 3.1.

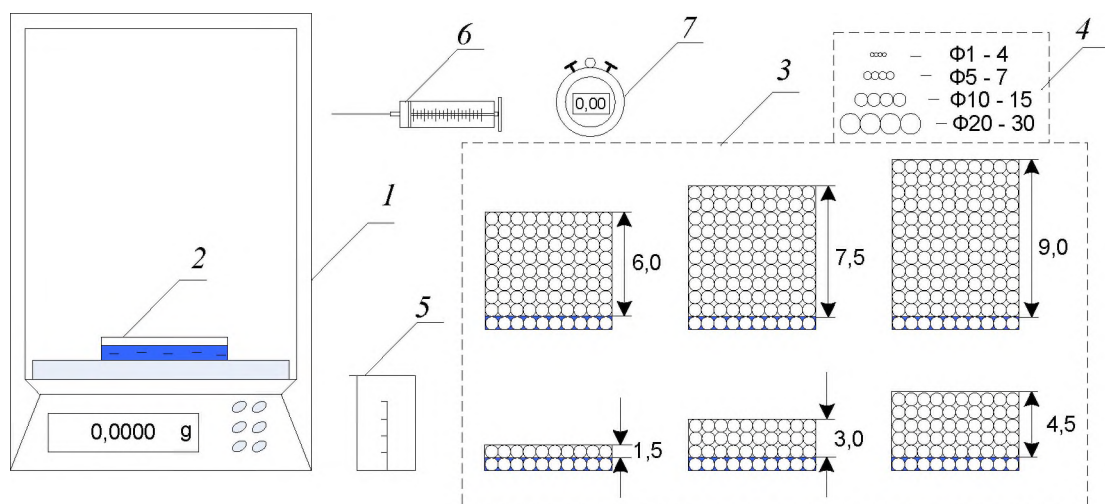
Таблица 3.1 – Свойства углеводородных жидкостей

№ п/п	Вещество	Свойства						
		Хим. формула	Молярная масса, г/моль	Плотность кг/м ³	Коеф. пов натяж. σ , мН/м	Дин. вязкость, μ 10 ⁻³ Па/с	Теплопроводность γ , Вт/м·г	
1	Ацетон [81]	C ₃ H ₆ O	58,08	790	23,7	0,45		
2	Бензин АИ-92*[76]	C _{6,911} H _{12,168}	95,3	731	21	0,6	0,161	
3	н-Гексан [77]	C ₆ H ₁₄	86,2	654	18,3	0,3	0,164	
4	Этиловый спирт [78]	C ₂ H ₆ O	46,1	785	22,1	2,5	0,124	
5	Керосин авиац. [80]	C _{11,054} H _{21,752}	154,7	781	24	2,7	0,167	
6	Дизтопливо «3»* [79]	C _{12,343} H _{23,889}	172,3	840	29,8	1,8-5,0	0,109	
№ п/п	Вещество	Свойства						
		T _{кип} , °C	T _{всп} , °C	T _{св} , °C	Константы уравнения Антуана			Скорость выгорания V _в , кг/(м ² ·с)
					A	B	Ca	
1	Ацетон [81]	56,5	-18	535	6,37551	1281,721	237,088	5,96·10 ⁻²
2	Бензин АИ-92*[76]	65-70	-37	320	4,26511	695,019	223,220	5,6·10 ⁻²
3	н-Гексан [77]	68,7	-23	233	5,99517	1166,274	223,661	10,3·10 ⁻²
4	Этиловый спирт [78]	78,5	13	400	7,81158	1918,508	252,125	3,7·10 ⁻²
5	Керосин авиац. [80]	189	40	236	5,12496	1223,85	203,341	4,8·10 ⁻²
6	Дизтопливо «3»* [79]	185-209	40	225	5,07818	1255,73	199,523	4,0·10 ⁻²

3.2.1 Экспериментальная оценка интенсивности испарения бензина АИ-92 через слой гранулированного пеностекла различных фракций

Подготовка к испытанию: аналитические весы должны быть откалиброваны на стабильной поверхности, на которой проводятся измерения; цилиндры пропиленовые очищены, промыты дистиллированной водой, высушены и взвешены на аналитических весах, после этого наполняются гранулированным пеностеклом одной фракции до верхнего уровня и снова взвешиваются. Условия проведения испытаний: температура воздуха 20,0 ± 0,1 °C; давление 99 – 102 кПа; относительная влажность воздуха 40-60 %.

Испытания проводились на четырех фракциях СГП (1-4, 5-7, 10-15 20-30 мм) при начальной высоте «сухого» слоя гранулированной подложки H_c от 1,5 см до 9 см с шагом 1,5. Подготовленные, взвешенные образцы СГП размещались в химически-стойких полипропиленовых емкостях диаметром 115 мм. Исследуемая жидкость наливалась через шприц в центр емкости под слой СГП до уровня 10 мм от основания емкости, после чего емкость с СГП и жидкостью 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 на Рисунке 3.1.



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

Рисунок 3.1 – Схема лабораторного оборудования для исследования испарения жидкостей с подложками из гранулированного пеностекла

В первой части лабораторного исследования испарения жидкостей через СГП и со свободной поверхности емкости использовался бензин АИ-92. Целью первой серии экспериментов являлось определение зависимостей интенсивности испарения W ($\text{г/с}\cdot\text{м}^2$) от времени τ (с) для разных фракций СГП и определение наиболее эффективной фракции по снижению показателя W . Фотография емкости с бензином АИ-92 и СГП на весах на Рисунке 3.2.



Рисунок 3.2 – Измерение массы бензина АИ-92 при испарении через СГП на аналитических весах

Интенсивность испарения углеводородных жидкостей определялась по формуле

$$W = \frac{m_n}{F_u \cdot T}, \quad (3.1)$$

где m_n – масса паров ЛВЖ, г; T – время, с; F_u – площадь емкости, m^2 .

Результаты лабораторного эксперимента по испарению жидкостей через СГП представлены в приложении А и на графиках рис. 3.3-3.8.

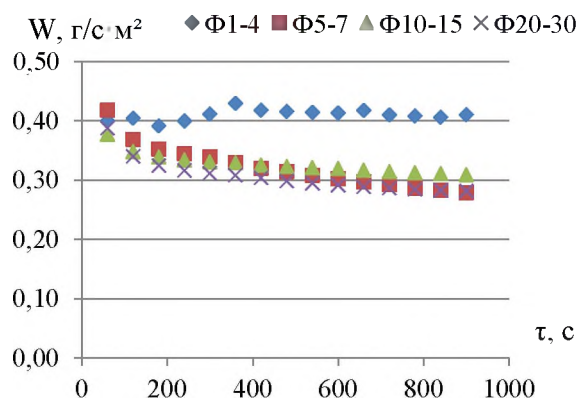


Рисунок 3.3 Интенсивность испарения бензина при $H_c = 1,5$ см

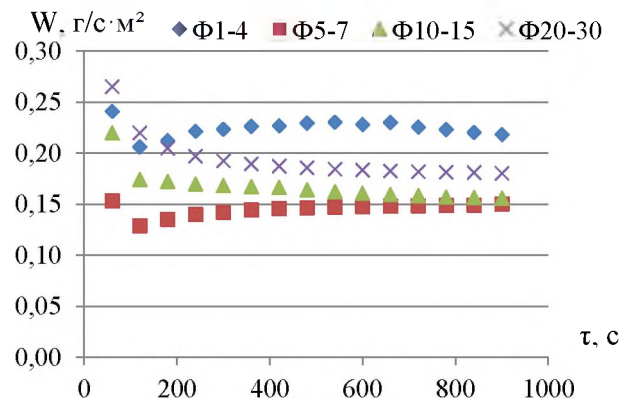


Рисунок 3.4 Интенсивность испарения бензина при $H_c = 3,0$ см

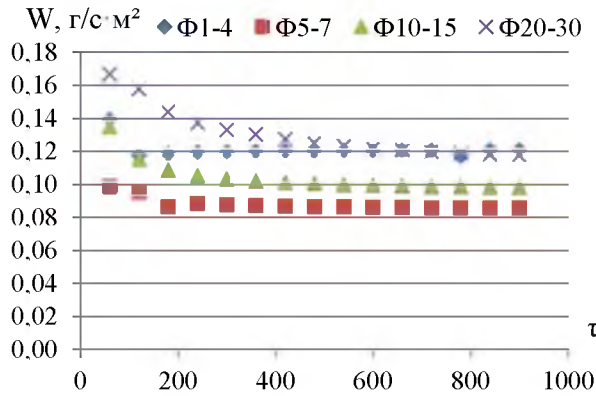


Рисунок 3.5 Интенсивность испарения бензина при $H_c = 4,5$ см

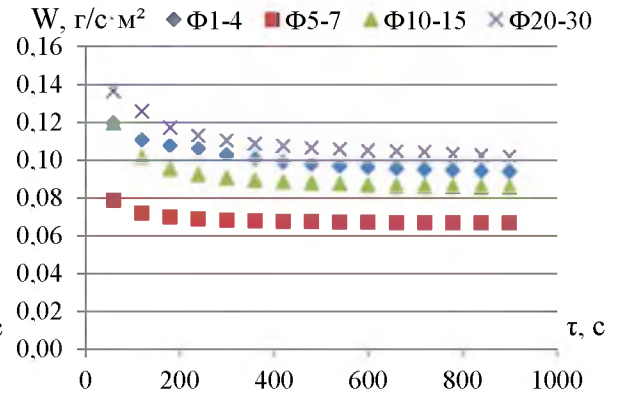


Рисунок 3.6 Интенсивность испарения бензина при $H_c = 6,0$ см

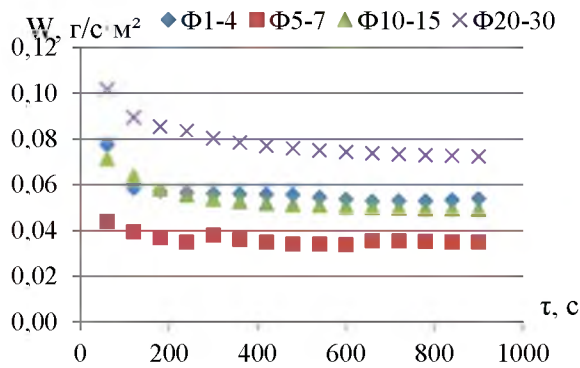


Рисунок 3.7 Интенсивность испарения бензина при $H_c = 7,5$ см

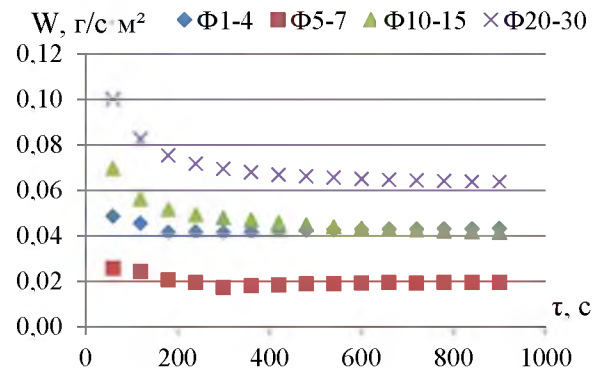


Рисунок 3.8 Интенсивность испарения бензина при $H_c = 9,0$ см

Зависимость осредненной интенсивности испарения бензина от высоты «сухого» слоя гранулированного пеностекла приведена на Рисунке 3.9.

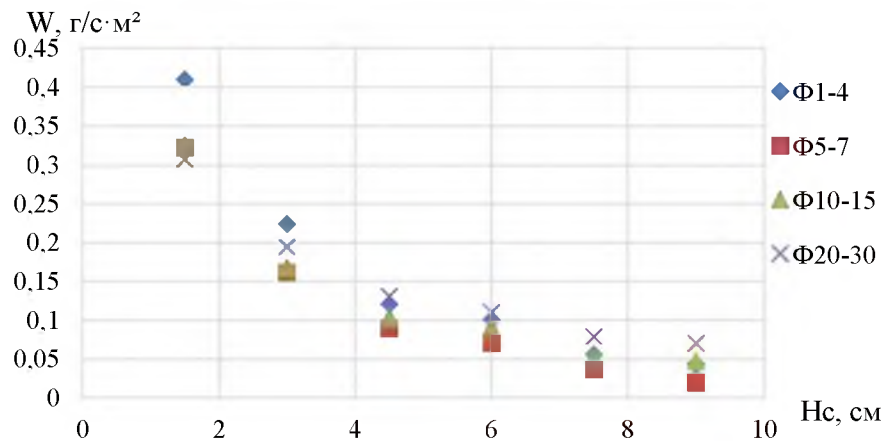


Рисунок 3.9 – Зависимость осредненной интенсивности испарения бензина от высоты «сухого» СПП

На графиках рис. 3.3-3.8 видно, что интенсивность испарения W ($\text{г/с}\cdot\text{м}^2$) при экранировании бензина АИ-92 у СГП фракции Ф5-7 самая низкая при различной толщине «сухого» слоя. Изменение показателя W имеет неоднозначную тенденцию: у более крупных фракций СГП (Ф10-15 Ф20-30), при экранировании СГП Ф1-4 интенсивность испарения может несколько увеличиваться, особенно при небольшой высоте СГП, что объяснимо капиллярным подъемом уровня жидкости у наименьшей фракции (рис. 3.3, 3.4). С увеличением толщины СГП интенсивность испарения со временем выравнивается, что объяснимо эффектом смачивания гранул по высоте. Капиллярный подъем уровня жидкости на фракции Ф5-7 незначителен (уровень подъема жидкости не более 5 мм) и происходит в первую минуту после пролива жидкости, в тоже время процесс смачивания гранул более длительный и может превышать 15 минут.

Экспериментальная оценка экранирования СГП поверхности испарения бензина АИ-92 показала, что на интенсивность испарения W ($\text{г/с}\cdot\text{м}^2$) при экранировании СГП фракции Ф1-4 оказывают влияние капиллярные силы и высокая смачиваемость гранул, при экранировании СГП более крупных фракций главенствующую роль играют показатели пористости слоя m и эквивалентный диаметр канала d_3 .

3.2.2 Оценка параметров фильтрации, влияющих на движение паров бензина АИ-92 через слой гранулированного пеностекла

Для подтверждения гипотезы о применимости модели пористой фильтрации по закону Дарси к процессу испарения жидкости через СГП по полученным экспериментальным данным средней скорости испарения бензина АИ-92 через СГП четырех рассматриваемых фракций пеностекла был рассчитан критерий Рейнольдса по формуле (2.19):

$$\text{Re} = \frac{4 \cdot d_3 \cdot \rho}{\mu} = \frac{4 \cdot w \cdot \rho}{f \cdot \mu} = \frac{4 \cdot u}{f \cdot \mu},$$

а зависимости числа Рейнольдса от высоты «сухого» СГП каждой фракции пеностекла представлены графике, Рисунок 3.10.

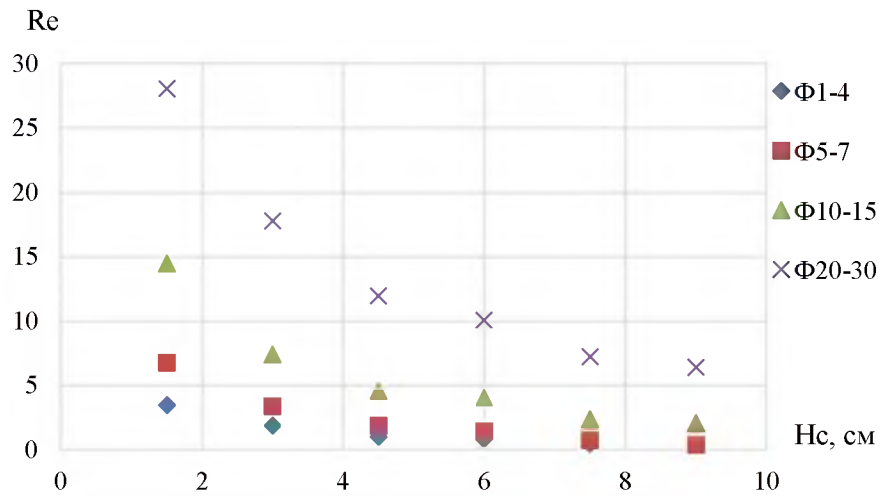


Рисунок 3.10 – Зависимость числа Re от высоты «сухого» СГП различных фракций пеностекла

На основе полученных зависимостей числа Рейнольдса от высоты «сухого» СГП можно сделать вывод: с увеличением высоты «сухого» СГП значения Re снижаются по экспоненте и при $H_c \leq 7,5$ см становятся меньше 1 для фракций пеностекла Φ1-4 и Φ5-7 (при $H_c = 7,5$ см: Φ1-4 – $Re = 0,47$; Φ5-7 – $Re = 0,77$; при $H_c = 9,0$ см: Φ1-4 – $Re = 0,36$; Φ5-7 – $Re = 0,41$). Это значит, что при таком профиле скорости испарения углеводородных жидкостей обосновано применение закона Дарси (раздел 2.4.1) и модели гашения пламени (раздел 2.4.4).

На основе экспериментальных данных по формуле (2.28):

$$R = \frac{248 \cdot \mu \cdot H_c \cdot (1 - m)^2}{m \cdot d^2}$$

было определено сопротивление, оказываемое потоку пара при прохождении через «сухой» СГП различных фракций пеностекла. Зависимость сопротивления R от высоты «сухого» СГП различных фракций пеностекла представлена на Рисунке 3.11.

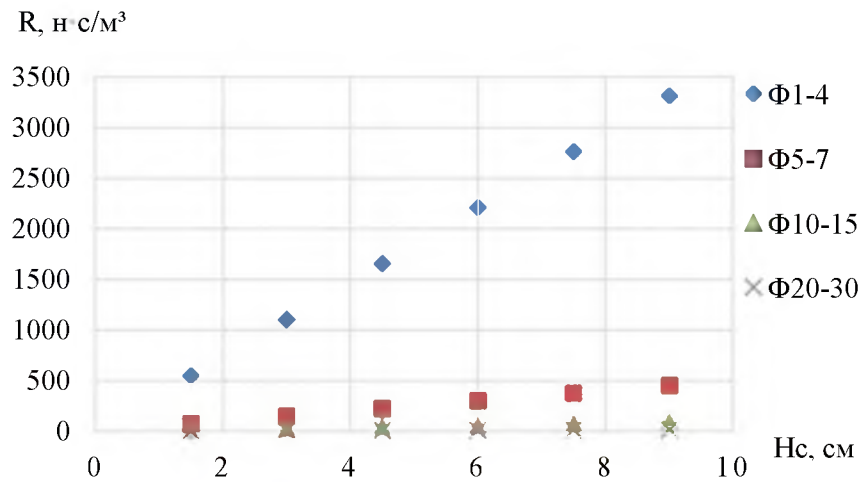


Рисунок 3.11 – Зависимость сопротивления R от высоты «сухого» СГП различных фракций пеностекла

На графике Рисунка 3.11 видно, что значительный рост сопротивления потоку пара жидкости с увеличением высоты «сухого» СГП наблюдается у фракций пеностекла Ф1-4 и Ф5-7. У фракций пеностекла Ф10-15 и Ф20-30 параметр R значительно выше, чем у более мелких фракций из-за высоких значений d_k и m . Высокое сопротивление, оказываемое движению жидкости СГП фракции Ф1-4, способствует вымыванию воронки на месте падения струи углеводородной жидкости вплоть до открытой поверхности, тем самым нарушается равномерность высоты «сухого» СГП.

Таким образом, фракция Ф5-7 обладает преимуществом перед другими фракциями пеностекла в снижении параметров испарения углеводородных жидкостей в условиях равновесного состояния СГП за счет геометрических параметров «сухого» СГП (H_c , d_k , S_k , m).

3.2.3 Экспериментальная оценка параметров испарения углеводородных жидкостей через слой гранулированного пеностекла фракции Ф5-7 мм

Вторая серия эксперимента по оценке эффективности снижения испарения исследуемых углеводородных жидкостей СГП фракции Ф5-7 проводилась аналогично первой серии эксперимента. Результаты оценки

интенсивности испарения углеводородных жидкостей по формуле (3.1) при различной высоте «сухого» СГП сведены в приложение Б.

Экспериментальная оценка испарения ЛВЖ при экранировании «сухим» СГП показала следующие результаты:

- при H_c (0; 1,5) см: интенсивность испарения углеводородных жидкостей максимальна в первую минуту с момента начала испарения, затем этот показатель снижается по экспоненциальной зависимости;

- при H_c (1,5; 3,0) см интенсивность испарения в первые минуты снижается у многокомпонентных углеводородных жидкостей затем

- при $H_c \geq 4,5$ см происходит значительное снижение интенсивности испарения у ацетона, н-гексана, бензина, а при $H_c \geq 3,0$ см – у этилового спирта, керосина и дизельного топлива.

Средняя скорость испарения исследуемых углеводородных жидкостей с поверхности пролива, покрытого слоем СГП за 15 минут сведена в Таблицу 3.2, а результаты оценки показателя $\ln(v_0/v)$ в Таблицу 3.3.

Таблица 3.2 – Средняя скорость испарения ЛВЖ v , 10^{-3} г/с

ЛВЖ	Высота «сухого» слоя» H_c						
	0 см	1,5 см	3 см	4,5 см	6 см	7,5 см	9 см
ацетон	4,595	2,415	1,126	0,609	0,526	0,391	0,289
бензин АИ-92	6,883	3,566	1,778	0,759	0,534	0,380	0,184
н-гексан (ч)	4,150	2,181	1,049	0,512	0,294	0,234	0,159
этанол	0,604	0,318	0,203	0,164	0,120	0,090	0,060
керосин авиац.	0,165	0,097	0,081	0,063	0,042	0,027	0,019
диз. топливо	0,057	0,037	0,011	0,009	0,007	0,004	0,002

Таблица 3.3 – Результаты оценки показателя $\ln(v_0/v)$

ЛВЖ	Высота «сухого» слоя» H_c					
	1,5 см	3 см	4,5 см	6 см	7,5 см	9 см
ацетон	0,637	1,245	1,856	2,002	2,297	2,549
н-гексан (ч)	0,631	1,222	1,873	2,425	2,671	3,112
бензин АИ-92	0,562	1,149	1,933	2,221	2,536	3,325
этанол	0,663	1,067	1,267	1,545	1,742	2,148
керосин авиац.	0,418	0,604	0,847	1,247	1,692	2,057
диз. топливо	0,593	1,397	1,609	1,829	2,506	3,167

Полученные значения использовались для нахождения коэффициента экранирования поверхности испарения ЛВЖ «сухим» СГП (далее - коэффициента экранирования) по формуле 2.91:

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

Результаты расчета коэффициентов экранирования сведены в Таблицу 3.4.

Таблица 3.4 – Коэффициенты экранирования

Вещество	Высота «сухого» СГП H_c , см						Средний $k_э$
	1,5	3,0	4,5	6,0	7,5	9 см	
Ацетон	0,43	0,47	0,45	0,40	0,36	0,37	0,41±0,02
Бензин АИ-92	0,44	0,45	0,49	0,43	0,39	0,37	0,43±0,02
Н-гексан	0,43	0,46	0,46	0,38	0,38	0,36	0,41±0,02
Этанол	0,43	0,36	0,29	0,27	0,25	0,26	0,31±0,03
Керосин авиац.	0,60	0,45	0,35	0,27	0,32	0,31	0,38±0,05
Диз. топливо	0,49	0,53	0,42	0,35	0,36	0,37	0,39±0,03

Полиномиальная регрессия наиболее точно описывает зависимость коэффициента экранирования от высоты «сухого» СГП, уравнение регрессии коэффициентов экранирования и коэффициент детерминации сведены в Таблицу 3.5.

Таблица 3.5 – Уравнения регрессии коэффициентов экранирования и коэффициент детерминации

№ п/п	Вещество	Уравнение полиномиальной регрессии	R ²
1	Ацетон	$k_э = -0,0017 \cdot H_c^2 + 0,0046 \cdot H_c + 0,4448$	0,7231
2	Бензин АИ-92	$k_э = -0,0021 \cdot H_c^2 + 0,0094 \cdot H_c + 0,4338$	0,7007
3	Н-гексан	$k_э = -0,0037 \cdot H_c^2 + 0,0273 \cdot H_c + 0,4097$	0,8085
4	Этанол	$k_э = 0,0045 \cdot H_c^2 - 0,0698 \cdot H_c + 0,5246$	0,9917
5	Керосин авиац.	$k_э = 0,0103 \cdot H_c^2 - 0,1446 \cdot H_c + 0,79$	0,9754
6	Диз. топливо	$k_э = 0,0027 \cdot H_c^2 - 0,0507 \cdot H_c + 0,5949$	0,7407

Зная массовую скорость испарения жидкости без экрана СГП v_0 можно определить скорость испарения жидкости для необходимой высоты H_c по выражению (2.89):

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

Коэффициент летучести для каждой углеводородной жидкости при различной высоте «сухого» СГП определялся исходя из (2.107) по формуле:

$$\beta = \frac{\ln \frac{m_0}{m(t_n)} - \ln \frac{m_0}{m(t_1)}}{t_n - t_1} \quad (3.2)$$

m_0 – начальная масса жидкости, г; $m(t_n)$ – масса жидкости по окончанию эксперимента, г; $m(t_1)$ – масса жидкости после испарения в начальный период, г; t_1 – начальный период испарения, принимается равным 60 сек; t_n – время окончания эксперимента, сек.

Коэффициенты летучести β исследуемых ЛВЖ через «сухой» слой H_c различной высоты приведены в Таблице 3.6.

Таблица 3.6 – Коэффициент летучести β

Вид ЛВЖ	Высота «сухого» слоя H_c						
	0	1,5	3,0	4,5	6,0	7,5	9,0
ацетон	9,01E-05	3,59E-05	1,37E-05	5,13E-06	3,3E-06	2,17E-06	8,54E-07
н-гексан	7,36E-05	2,68E-05	1,01E-05	4,15E-06	3,12E-06	2,02E-06	1,34E-06
бензин АИ-92	7,39E-05	2,42E-05	9,92E-06	4,06E-06	1,87E-06	1,24E-06	6,91E-07
этанол	9,72E-06	3,1E-06	1,56E-06	1,06E-06	7,02E-07	5,08E-07	2,93E-07
керосин авиац.	5,37E-06	1,72E-06	8,12E-07	5,07E-07	4,32E-07	1,98E-07	1,16E-07
диз. топливо	6,88E-07	2,32E-07	8,29E-08	5,45E-08	3,66E-08	1,56E-08	6,67E-09

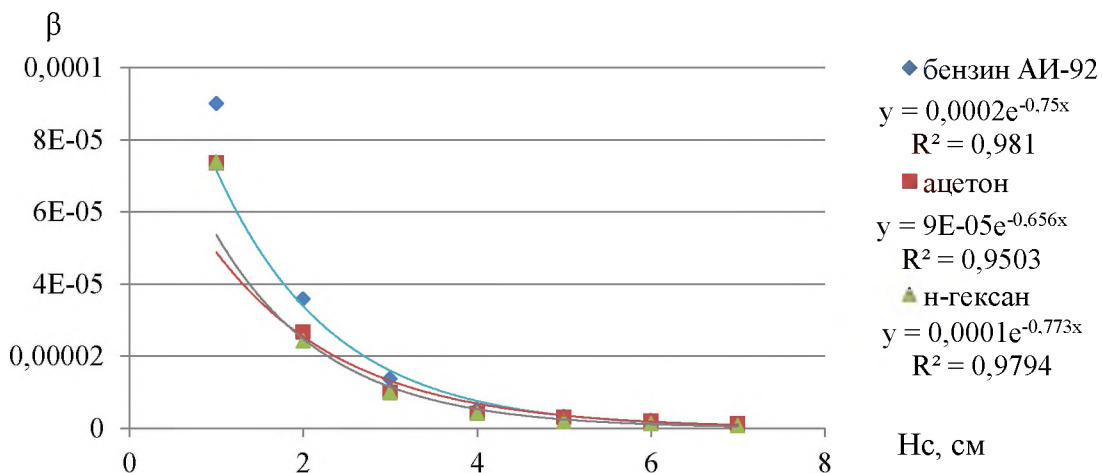


Рисунок 3.12 – Зависимость коэффициента летучести быстроиспаряющихся жидкостей от высоты «сухого» СГП

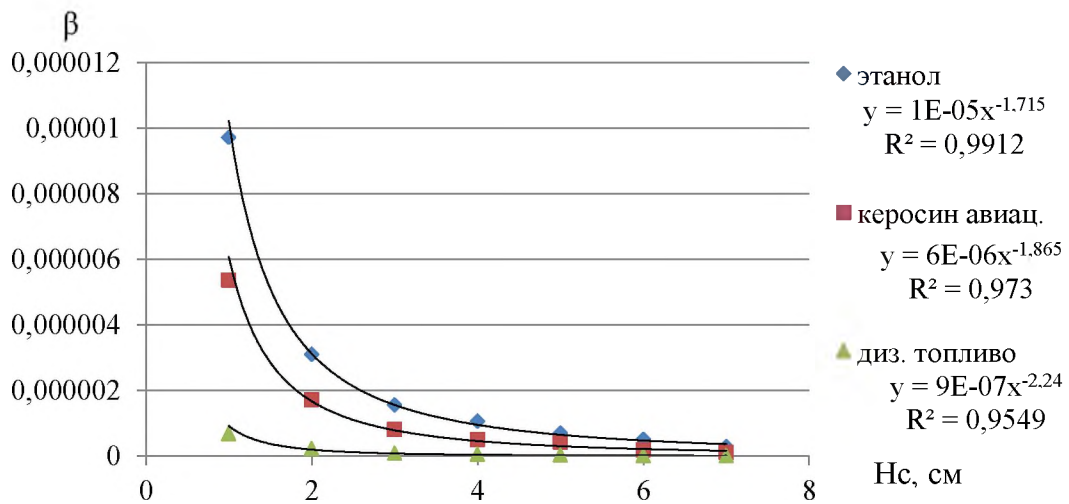


Рисунок 3.13 – Зависимость коэффициента летучести медленноиспаряющихся жидкостей от высоты «сухого» СГП

Зная начальную массу жидкости m_0 можно оценить скорость испарения жидкости для необходимой высоты H_c по выражению (2.105):

$$m(t) = m_0 \cdot \exp(-\beta t)$$

3.2.4 Оценка высоты зоны, ограниченной нижним концентрационным пределом распространения пламени паров по результатам лабораторного эксперимента

Для оценки времени сгорания паров углеводородных жидкостей τ (с) при экранировании поверхности испарения СГП были проведены расчеты высоты зоны, ограниченной НКПР паров $Z_{нкпр}$ (м) по формуле (2.15):

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

Результаты расчета $Z_{нкпр}$ представлены на графиках (Рисунки 3.14 – 3.18) и сведены в приложение В.

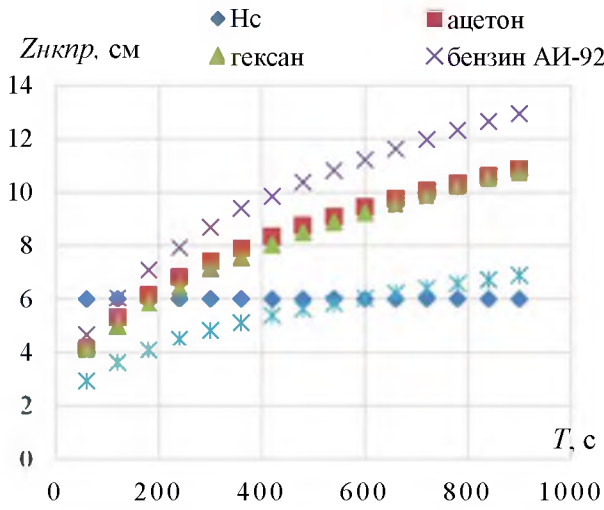


Рисунок 3.14 - Зависимость высоты зоны, ограниченной НКПР паров от времени испарения при $H_c = 6,0$ см

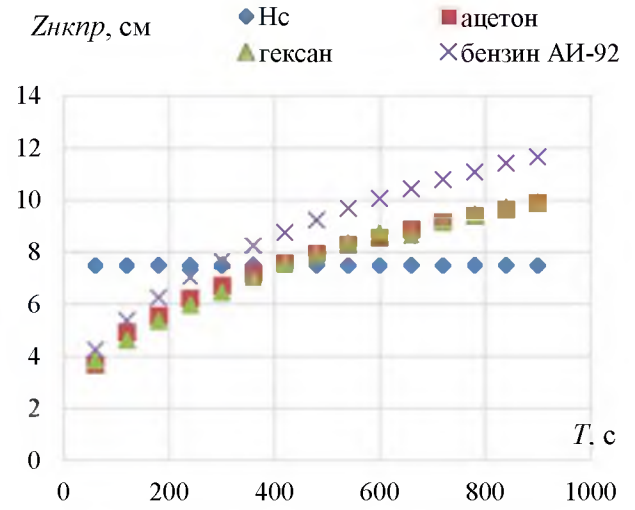


Рисунок 3.15 – Зависимость высоты зоны, ограниченной НКПР паров от времени испарения при $H_c = 7,5$ см

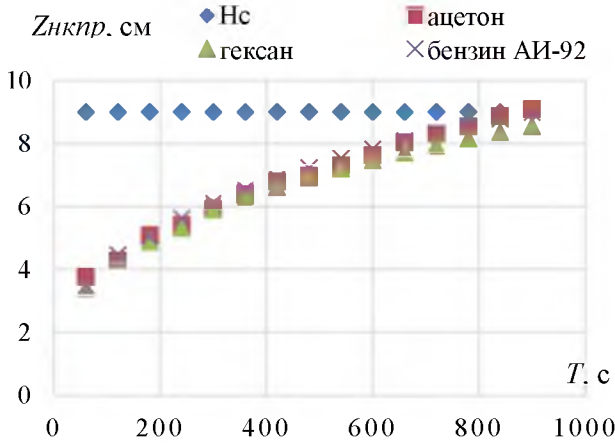


Рисунок 3.16 – Зависимость высоты зоны, ограниченной НКПР паров от времени испарения при $H_c = 9,0$ см

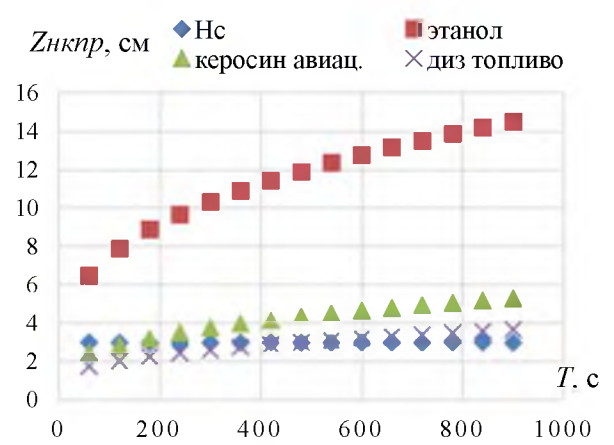


Рисунок 3.17 – Зависимость высоты зоны, ограниченной НКПР паров от времени испарения при $H_c = 3,0$ см

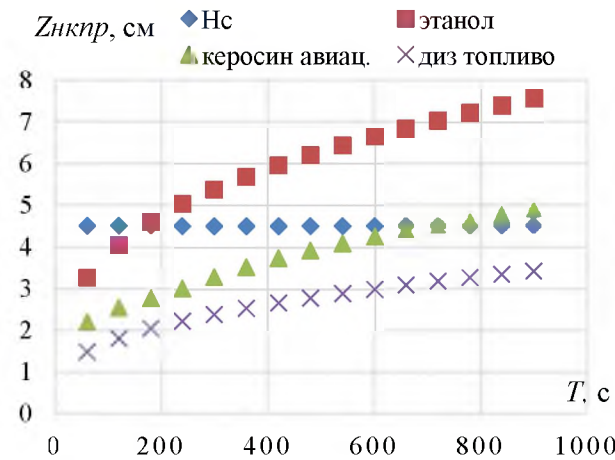


Рисунок 3.18 – Зависимость высоты зоны, ограниченной НКПР паров от времени испарения при $H_c = 4,5$ см

Оценка высоты зон, ограниченных НКПР паров ЛВЖ показала, что для бензина, ацетона, н-гексана $Z_{нкпр} > H_c$: при $H_c = 6$ см и времени испарения $T > 150$ секунд; при $H_c = 7,5$ см и $T > 300$ секунд. При высоте «сухого» слоя СГП $H_c = 9,0$ см $Z_{нкпр} < H_c$ при лимитированном времени испарения $T = 900$ секунд. Для этанола $Z_{нкпр} > H_c$, при $H_c = 6$ см и $T > 600$ секунд, а также при $H_c = 4,5$ см и $T > 190$ секунд. Для керосина $Z_{нкпр} > H_c$ при $H_c = 3,0$ см и $T > 200$ секунд, при $H_c = 4,5$ см и $T > 700$ секунд. Для диз. топлива $Z_{нкпр} > H_c$ при $H_c = 3,0$ см и $T > 500$ секунд, $Z_{нкпр} < H_c$ при $H_c = 4,5$ см.

Результаты оценки времени сгорания паров ЛВЖ τ_z (с) при проливе ЛВЖ на СГП, полученные по формуле (2.14):

$$\tau_z = \frac{Z_{нкпр}}{u_n}$$

сведены в приложение Г. Изменение времени сгорания паров τ_z (при $T = 15$ минут) от высоты «сухого» СГП H_c представлено на Рисунке 3.19.

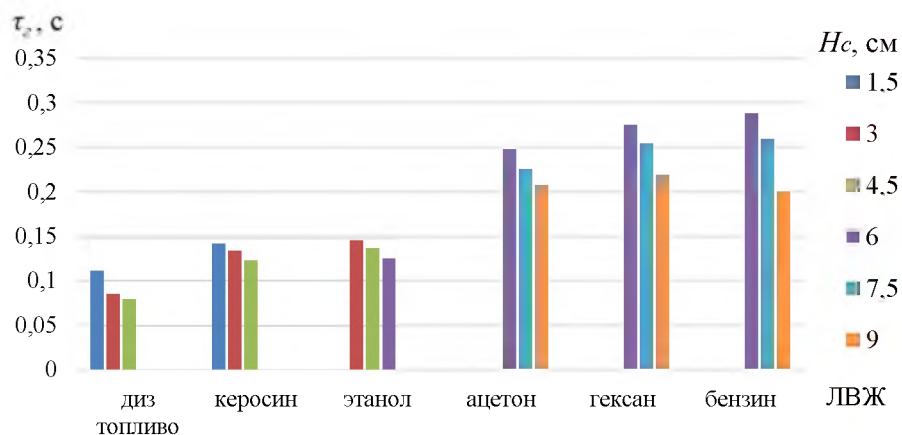
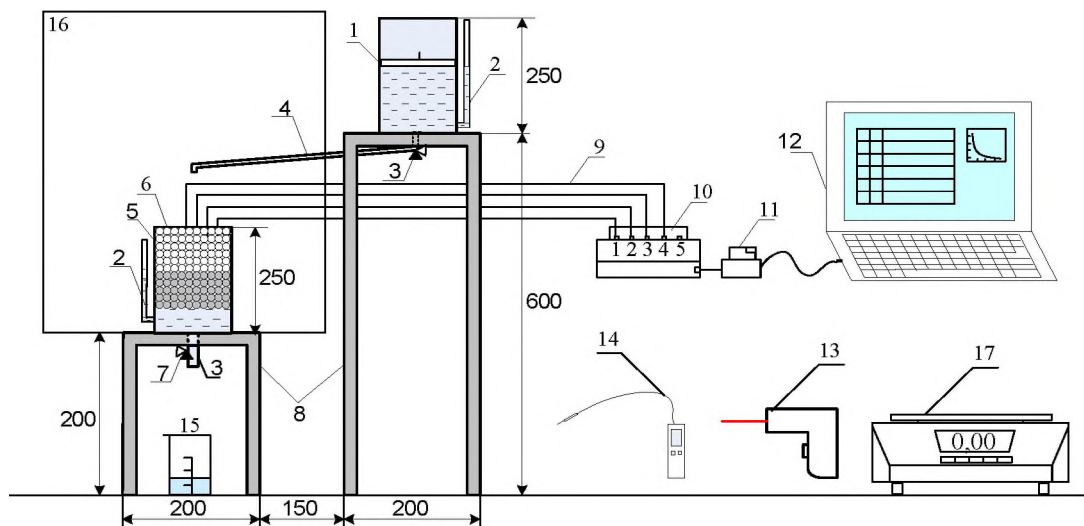


Рисунок 3.19 – Время сгорания паров ЛВЖ при высоте «сухого» СГП

Полученные результаты оценки высоты зон, ограниченных НКПР паров ЛВЖ при экранировании поверхности испарения СГП показывают величину H_c , выше которой распространение пламени исследуемых ЛВЖ невозможно, поэтому экспериментальные исследования по определению критической высоты «сухого» СГП $H_{кр}$ целесообразно проводить при высоте H_c близкой к значениям $Z_{нкпр}$.

3.3 Лабораторные исследования параметров гашения пламени углеводородных жидкостей экранирующим слоем гранулированного пеностекла

Испытание образцов гранулированной подложки различной высоты в условиях горения жидкости проводилось в 2 этапа: 1) определение высоты «сухого» СГП, при котором происходит гашение пламени; 2) оценка скорости горения, удельной массовой скорости выгорания жидкости, распределения температур в слое СГП на пределе гашения пламени [121, 122, 124-128]. Для проведения экспериментов была собрана лабораторная установка, схема которой представлена на Рисунке 3.20.



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 3.20 – Схема лабораторной установки по определению параметров гашения пламени ЛВЖ слоем СГП

Технические характеристики лабораторной установки и оборудования

Станины металлические размерами 200 х 200 мм и 200 х 600 мм обеспечивали устойчивость емкостей для проведения испытаний.

Стальная емкость для горючей жидкости с плавающей крышкой из пенопласта высотой 250 мм и диаметром 150 мм с мерной трубкой диаметром 15 мм, высотой 200 мм для измерения столба жидкости.

Трубопровод (марка стали ст.3 по ГОСТ 380-2005, толщина металла 2 мм, длина 450 мм) для слива горючей жидкости из верхней емкости в емкость с СГП.

Стальные емкости-приемники горючей жидкости с СГП круглого сечения диаметром 150 мм и прямоугольного сечения 112 x 157 мм (площади сечения емкостей равны) высотой 50, 100, 150, 200, 250 мм. Все емкости выполнены из металла стали марки ст.3 по ГОСТ 380-2005 толщиной 2 мм.

Термоэлектрические преобразователи (термопары) типа КТХА (диапазон измерений от минус 40 до плюс 1250 °С, толщина 3 мм) для измерения температур в слоях гранулированной подложки.

Тепловизор Fluke Ti20 диапазон измерений от –20 °С до +350 °С, частота кадров 9 Гц, минимальный диапазон (в ручном режиме) 2,5 °С.

Модуль ввода аналоговый МВА-8 ОБЕН для передачи измеренных значений по интерфейсу RS-485 на 8 входов.

Преобразователь интерфейсов RS-485 ОБЕН для взаимного преобразования сигналов интерфейсов USB.

Термоанемометр Testo 425 для измерения температуры воздуха, и скорости воздушного потока перед началом испытаний.

Емкость из стекла со шкалой для слива горючей жидкости 400 см³.

Персональный компьютер (ноутбук Asus) с программным обеспечением МВА-8, InsideIR 4.0 для записи и вывода данных на экран.

Весы лабораторные электронные AND GX-4000 с дискретностью отсчета от 0,01 г, классом точности по ГОСТ Р 53228-2008 – II [83].

Гранулированные подложки фракции высотой от 1,5 см до 24 см с шагом 1,5 см ТУ 5914-001-15068529-2006 [62].

Линейка измерительная металлическая 300 мм по ГОСТ 427-75 [98].

Секундомер электронный с дискретностью отсчета – 0,01 с.

Вид лабораторной установки по определению высоты «сухого» слоя гранулированного пеностекла H_c , при котором горение ЛВЖ прекращается представлена на Рисунке 3.21.



Рисунок 3.21 – Вид лабораторной установки для определения параметров гашения пламени ЛВЖ в емкости с СГП

3.3.1 Экспериментальная оценка критической высоты слоя гранулированного пеностекла, при котором происходит гашение пламени

Для определения высоты «сухого слоя» СГП, при котором происходит гашение пламени в металлическую емкость $d = 150$ мм с мерными трубками и сливными патрубками располагались на станине, по которой располагался мерный стакан, затем насыпалось пеностекло фракции $\Phi 5-7$ мм до уровня $H = H_e - 10$ мм (H_e – высота емкости). Высота емкостей для данной серии эксперимента выбиралась исходя из максимальной высоты зон $Z_{нкр}$

исследуемых ЛВЖ и составляла 50 мм (керосин, дизельное топливо), 100 мм (этиловый спирт), 150 мм (ацетон, бензин, н-гексан). Градуировка уровня ЛВЖ в емкости с СГП проводилась при помощи измерительной линейки и мерной трубки. ЛВЖ наливалась до уровня, при котором поверхность СГП была вровень с кромкой емкости.

Проведение испытаний (серия №1)

Инициирование горения производилось при помощи лучины, через 1 минуту от начала горения медленно открывался сливной патрубок и производился слив ЛВЖ в мерный стакан до момента гашения пламени, затем сливной патрубок закрывался. Схема слива ЛВЖ из емкости с СГП при горении ЛВЖ представлена на Рисунке 3.22.

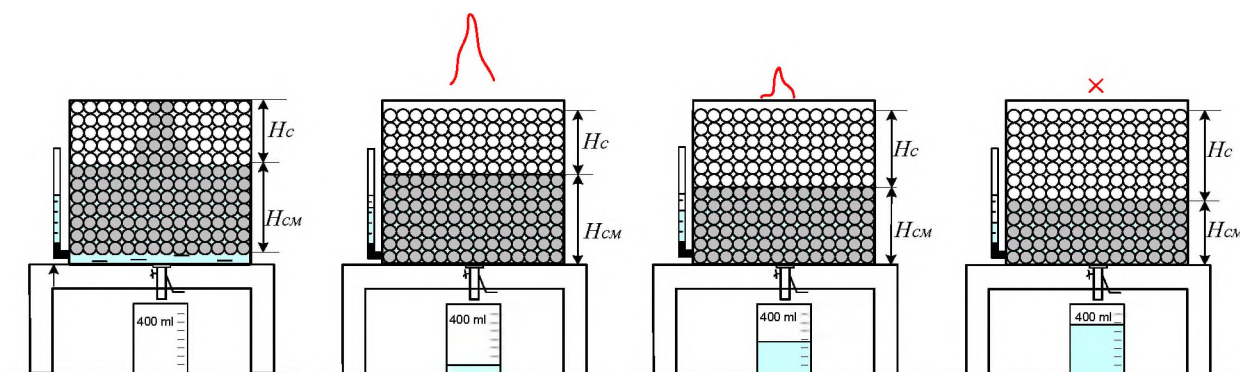


Рисунок 3.22 – Схема слива ЛВЖ из емкости с СГП при горении ЛВЖ

По уровню ЛВЖ в мерной трубке определялась высота «сухого» СГП. Эксперимент повторялся пять раз, полученные значения $H_{кр}$, при которых происходит гашение пламени, сведены в Таблицу 3.7.

Таблица 3.7 – Критическая высота «сухого» слоя СГП, при которой происходит гашение пламени $H_{кр}$

Номер опыта	Критическая высота «сухого» СГП $H_{кр}$, см					
	Ацетон	Бензин	Гексан	Этанол	Керосин	Диз. топливо
Опыт №1	7,6	8,7	7,0	4,4	3	2,0
Опыт №2	7,8	8,2	7,3	4,3	3,2	2,2
Опыт №3	8,0	8,7	7,5	4,3	3,2	1,8
Опыт №4	7,7	8,4	7,2	4,1	3,3	2,0
Опыт №5	7,9	8,7	7,4	4,2	3	2,2
Среднее	7,8	8,5	7,3	4,3	3,1	2,0

По результатам анализа эксперимента получена зависимость критической высоты «сухого» СГП $H_{кр}$ от давления насыщенных паров P_n , Рисунок 3.23.

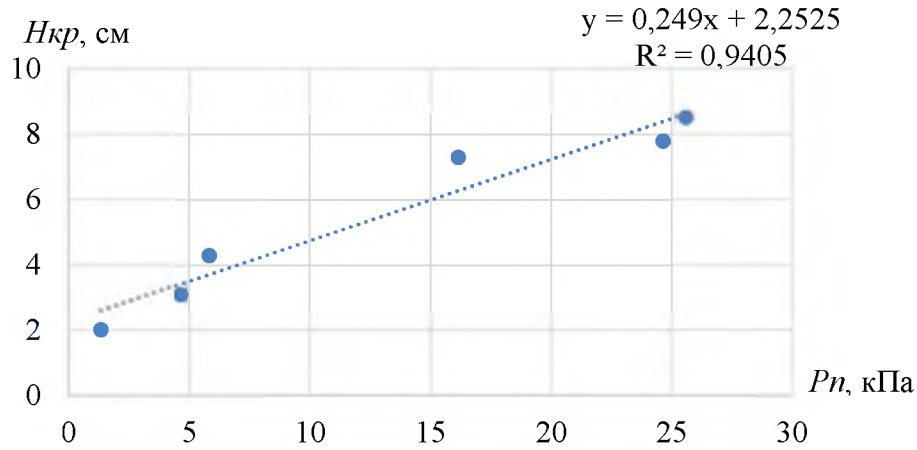


Рисунок 3.23 Зависимость критической высоты «сухого» СГП от давления насыщенных паров

Определив средние значения критической высоты «сухого» СГП $H_{кр}$ (Таблица 3.7) время перепада давления $\tau_{\Delta p}$ при условии $H_{кр} = l$ можно рассчитать по формуле (2.44):

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

Распределение значений $H_{кр}$ (Рисунок 3.23) наиболее точно описывается линейной зависимостью с функцией $y = ax + b$, поэтому выражение (2.45) будет иметь вид:

$$H_{кр} = a \sqrt{\frac{2 \cdot k \cdot P_n \cdot \tau_{\Delta p}}{m \cdot \mu}} + b, \quad (3.2)$$

где:

$$\sqrt{\frac{2 \cdot k \cdot P_n \cdot \tau_{\Delta p}}{m \cdot \mu}} = x, \quad (3.3)$$

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

$$H_{кр} = a \cdot x + b \quad (3.4)$$

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

Сумма квадратов отклонений, полученных экспериментальных значений $x_i = H_{кр}(\vartheta)$ от прямой расчетных значений $y_i = H_{кр}(p)$ имеет вид:

$$\varphi = \sum_{i=1}^n (\Delta y_i)^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - (ax_i + b))^2. \quad (3.5)$$

значения a и b , при которых φ имеет минимум, соответственно:

$$\frac{\partial \varphi}{\partial a} = \frac{\partial \sum_{i=1}^n (\Delta y_i)^2}{\partial a} = \frac{\partial \sum_{i=1}^n (y_i - (ax_i + b))^2}{\partial a} = 0; \quad (3.6)$$

$$\frac{\partial \varphi}{\partial b} = \frac{\partial \sum_{i=1}^n (\Delta y_i)^2}{\partial b} = \frac{\partial \sum_{i=1}^n (y_i - (ax_i + b))^2}{\partial b} = 0. \quad (3.7)$$

Совместное решение этих уравнений дает:

$$a = \frac{n \sum_{i=1}^n x_i y_i - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - (\sum_{i=1}^n x_i)^2} = 0,9959 \quad (3.8)$$

$$b = \frac{1}{n} (\sum_{i=1}^n y_i - k \sum_{i=1}^n x_i) = -0,0038 \quad (3.9)$$

Результаты расчета по методу наименьших квадратов сведены в Таблицу 3.8.

Таблица 3.8 – Результаты расчета, эксперимента и их обработка

Вид ЛВЖ	x	y	x^2	xy	$ax + b$	$y - (ax + b)$	$(y - (ax + b))^2$
Бензин	0,08027	0,08500	0,00644	0,00682	0,08376	0,00124	0,00000
Ацетон	0,07742	0,07800	0,00599	0,00604	0,08093	-0,00293	0,00001
Гексан	0,06779	0,07300	0,00460	0,00495	0,07134	0,00166	0,00000
Этанол	0,03614	0,04300	0,00131	0,00155	0,03982	0,00318	0,00001
Керосин	0,02698	0,03100	0,00073	0,00084	0,03069	0,00031	0,00000
ДТ	0,01974	0,02000	0,00039	0,00039	0,02348	-0,00348	0,00001
Сумма	0,3083	0,3300	0,0195	0,0206			

Среднеквадратичные ошибки определения a и b равны:

$$S_1 = \sqrt{\frac{\sum (y_i - bx_i - a)^2}{(n-2) \sum (x_i - \bar{x})^2}} = 0,021 \quad (3.10)$$

$$S_2 = \sqrt{\frac{\sum (y_i - bx_i - a)^2}{(n-2)} \cdot \left(\frac{1}{n} + \frac{\bar{x}^2}{\sum (x_i - \bar{x})^2} \right)} = 0,0016 \quad (3.11)$$

Так как $S_1 > S_2$, то прямая $y = ax + b$ лучше приближает полученные значения. Экспериментальная $H_{кр}(\varepsilon)$ и расчетная зависимости $H_{кр}(p)$ от параметра x представлены на графике, Рисунок 3.24.

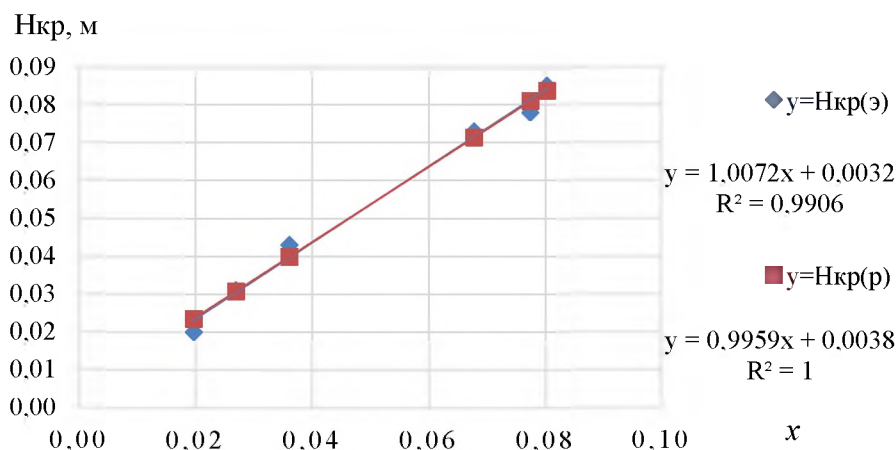


Рисунок 3.24 – Зависимость критической высоты «сухого» СГП от параметра x

Максимальное отличие расчетной от экспериментальной величины не превышает 15%. Физико-химические показатели исследуемых веществ Pn , μ , u_n [99,100], и расчетные параметры $H_{кр}$, $Z_{нкp}$, x , τ , полученные по результатам анализа лабораторного эксперимента сведены в Таблицу 3.9.

Таблица 3.9 – Физико-химические показатели исследуемых веществ и результаты оценки параметров $Z_{нкp}$, x , $\tau_{\Delta p}$ и $H_{кр}$

Параметры	Бензин	Ацетон	Гексан	Этанол	Керосин	ДТ
Pn , Па	25559	24647,17	16155,96	5851,87	4665,5	1333
$\mu \cdot 10^{-6}$, Па·с	7,11	7,37	6,3	8,38	11,15	6,4
u_n , м/с	0,45	0,44	0,39	0,56	0,6	0,6
$\tau_{\Delta p}$, с	0,23	0,23	0,23	0,24	0,23	0,24
$Z_{нкp}$, м	0,110	0,098	0,099	0,078	0,053	0,036
x	0,081	0,078	0,068	0,036	0,027	0,02
$H_{кр}(p)$, м	0,083	0,080	0,071	0,039	0,031	0,023
$H_{кр}(\varepsilon)$, м	0,085	0,078	0,073	0,043	0,031	0,020

Примечание: p - расчет; ε – лабораторный эксперимент.

3.3.2 Экспериментальная оценка высоты пламени и распределения температур в слое гранулированного пеностекла

Для определения высоты пламени при различной высоте «сухого» слоя СГП, а также оценки распределения температур в слое СГП на пределе гашения пламени проводилась вторая серия экспериментов. Термоэлектрические преобразователи (9) должны быть подключены к модулю ввода аналоговому МВА-8 (10). С помощью преобразователя интерфейсов RS-485 (11) и программного обеспечения МВА-8 производится опрос входов, данные выводились на ПК (12). Положение среды «Гранулы – СГП» относительно термодпар в начале эксперимента, представлено на Рисунке 3.25, по окончанию эксперимента – на Рисунке 3.26.

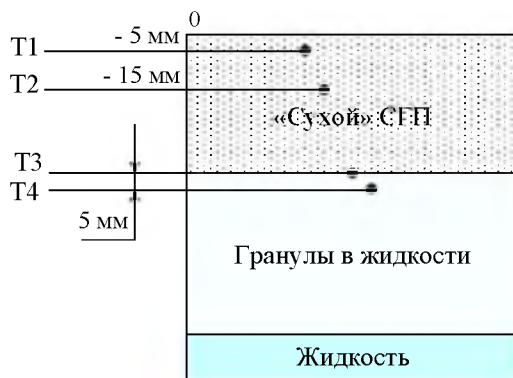


Рисунок 3.25 – Положение среды «Гранулы – СГП» относительно термодпар (начало эксперимента)

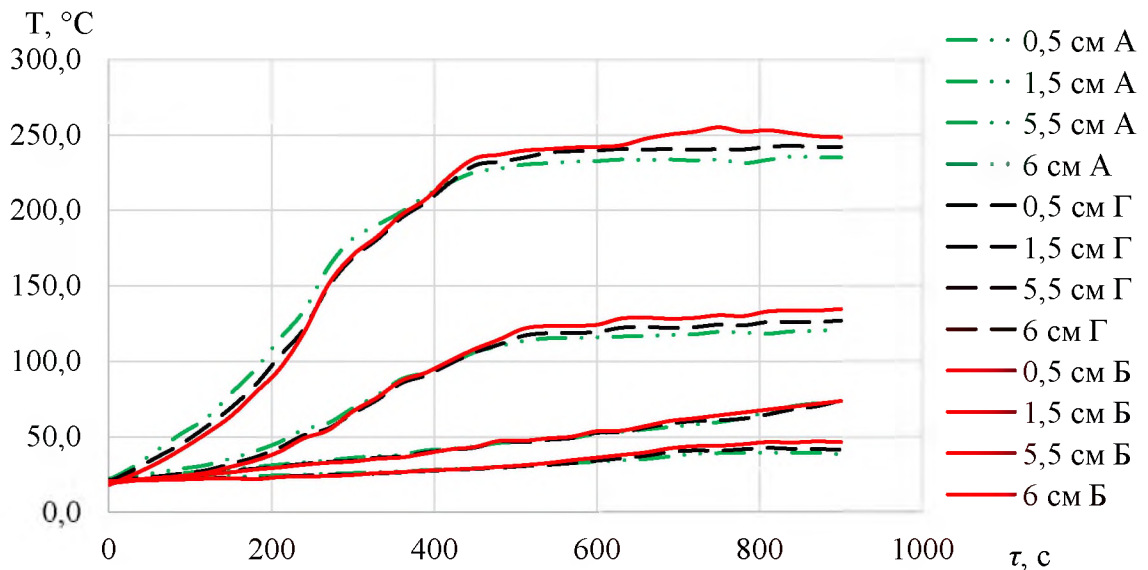


Рисунок 3.26 – Положение среды «Гранулы – СГП» относительно термодпар (окончание эксперимента)

Термоанемометром *Testo 425* (14) снимались показания температуры и скорости движения воздуха в помещении. Термопара Т1 расположена в верхней части СГП на 5 мм ниже поверхности СГП, термопара Т2 расположена на 15 мм ниже поверхности СГП, термопара Т3 расположена на границе «сухого» и «смоченного» слоев СГП, термопара Т4 расположена на 5 мм ниже термопары Т3. В эксперименте с дизельным топливом термопара Т2 исключена из-за малой высоты «сухого» слоя.

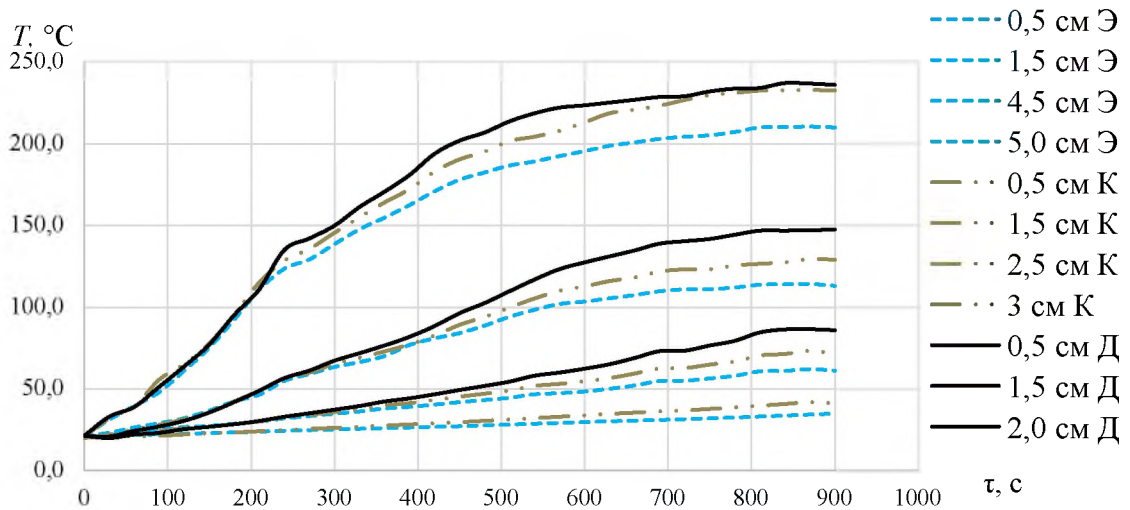
Проведение испытаний (серия №2)

В емкость с плавающей крышкой (1) наливалась исследуемая ЛВЖ, уровень жидкости определялся мерной трубкой (2). В приемной емкости (5) размещалась СГП с высотой «сухого» слоя на 5-12 мм ниже $H_{кр}$, определенного в первой серии эксперимента, для поддержания устойчивого ламинарного горения. Затем, открывался вентиль (3) и производился слив жидкости по трубопроводу (4) в центр емкости (5) с образцом СГП (6). С помощью лучины производилось зажигание паров ЛВЖ. С помощью тепловизора *Fluke Ti20* (13) снимались термограммы области горения жидкости и емкости с СГП (5). Процесс горения фиксировался на фотовидеокамеру *Canon SX20*. После проведения эксперимента ЛВЖ сливалась через патрубок с вентилем (7) в мерный стакан (15). Эксперимент для каждой ЛВЖ повторялся пять раз, осредненные показания термопар представлены на Рисунках 3.27, 3.28.



А – ацетон, Б – бензин АИ-92, Г – н-гексан

Рисунок 3.27 – Изменение температуры в точках расположения термопар в емкости с СГП при горении ЛВЖ



Э – этанол, К – керосин, Д – диз. топливо

Рисунок 3.28 – Изменение температуры в точках расположения термодатчиков в емкости с СГП при горении ЛВЖ

В ходе испытаний высота пламени над «сухим» СГП не превышала 5 см, при этом горение происходило не по всей площади, а на локальном участке диаметром ~ 3 см. При установившемся режиме горения, максимальная температура паровой фазы в слое СГП на расстоянии - 5 мм от основания пламени (в точке Т1) варьируется $210\text{ }^{\circ}\text{C} - 254\text{ }^{\circ}\text{C}$. На отметке - 15 мм от основания пламени (точка Т2) температура значительно снижается и входит в диапазон $115\text{ }^{\circ}\text{C} - 136\text{ }^{\circ}\text{C}$. На границе раздела паровой и жидкой фазы (точка Т3) температура находится в пределах $62\text{ }^{\circ}\text{C} - 74\text{ }^{\circ}\text{C}$, что близко к температуре кипения бензина, гексана, этанола. При горении ацетона наблюдался небольшой температурный градиент при достижении температуры кипения равной $56,5\text{ }^{\circ}\text{C}$, что свидетельствует о переходе из жидкой в паровую фазу в точке Т3. При горении дизельного топлива температура в точке Т3 достигала $148\text{ }^{\circ}\text{C}$, что гораздо выше, чем при горении остальных исследуемых ЛВЖ из-за малой высоты «сухого» слоя (1,5 см). В нижней точке Т4 температура находилась в пределах $34\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $46\text{ }^{\circ}\text{C}$. Распределение температур в паровой фазе (в точке Т1) близко к экспериментальным значениям, полученным при исследовании горения ЛВЖ с поверхности гранул $d = 3,18 - 5\text{ мм}$ [43,86].

Результаты экспериментальной оценки высоты пламени при различных значениях H_c и при отсутствии СГП представлены на графике, Рисунок 3.29.

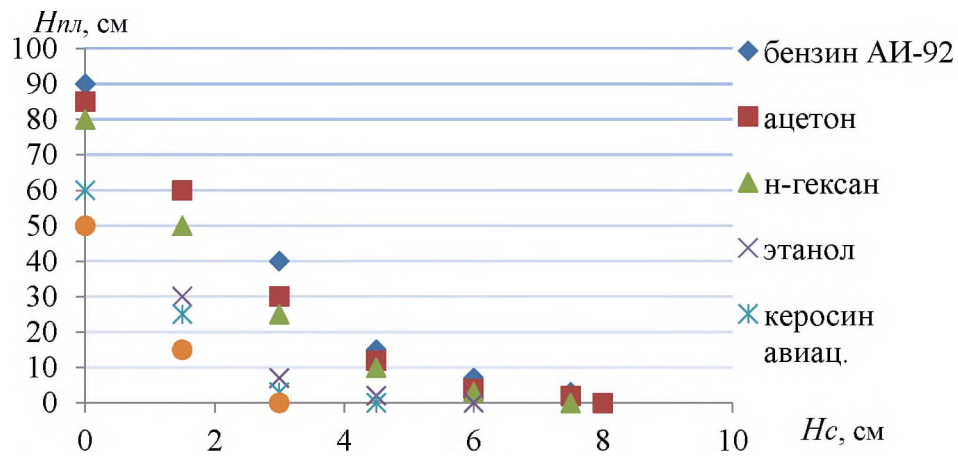


Рисунок 3.29 – Зависимость высоты пламени от высоты «сухого» СГП

Типичные термограммы горения бензина АИ-92 в емкости с СГП, снятые тепловизором *Fluke Ti 20* на 5 минуте горения представлены на Рисунке 3.30.

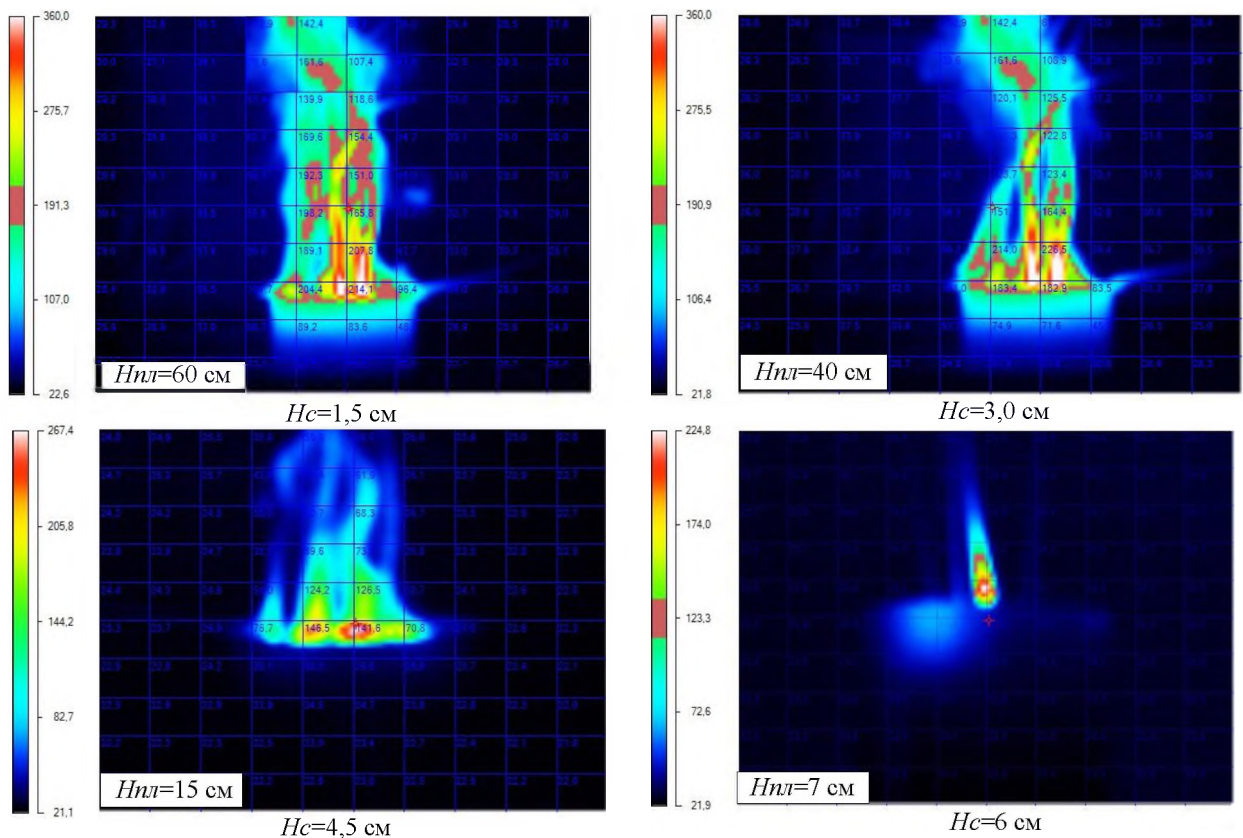


Рисунок 3.30 – Термограммы горения бензина АИ-92 в емкости с СГП

Анализ результатов эксперимента показал, что с увеличением высоты «сухого» СГП снижается не только высота пламени, но и площадь горения, пропадают пульсации пламени, горение проходит в ламинарном режиме. Основание пламени смещается к центру емкости: при $H_c \sim 6,0$ см у бензина, ацетона, бензина, гексана; при $H_c \sim 3,0$ см у этанола, керосина; при $H_c \sim 1,5$ см у дизельного топлива (при этом стенки емкости остаются «холодными» в течение 15 минут горения).

3.3.3 Экспериментальная оценка скорости горения на пределе гашения пламени углеводородных жидкостей при экранировании слоем гранулированного пеностекла

С целью определения скорости горения жидкостей проводилась третья серия испытаний. Для точного измерения убыли массы при горении жидкостей использовались лабораторные электронные весы AND GX-4000 с дискретностью отсчета от 0,01 г, а также более легкие емкости: круглого сечения из термостойкого стекла диаметром 150 мм и высотой 150 мм и прямоугольной из стали марки ст. 3 со сторонами 112 x 157 мм толщиной 1,5 мм. Время сгорания паров над поверхностью СГП измерялось электронным 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. Последовательная серия кадров вспышки и последующего горения гексана в емкости с СГП высотой 6 см на весах представлена на Рисунке 3.31.

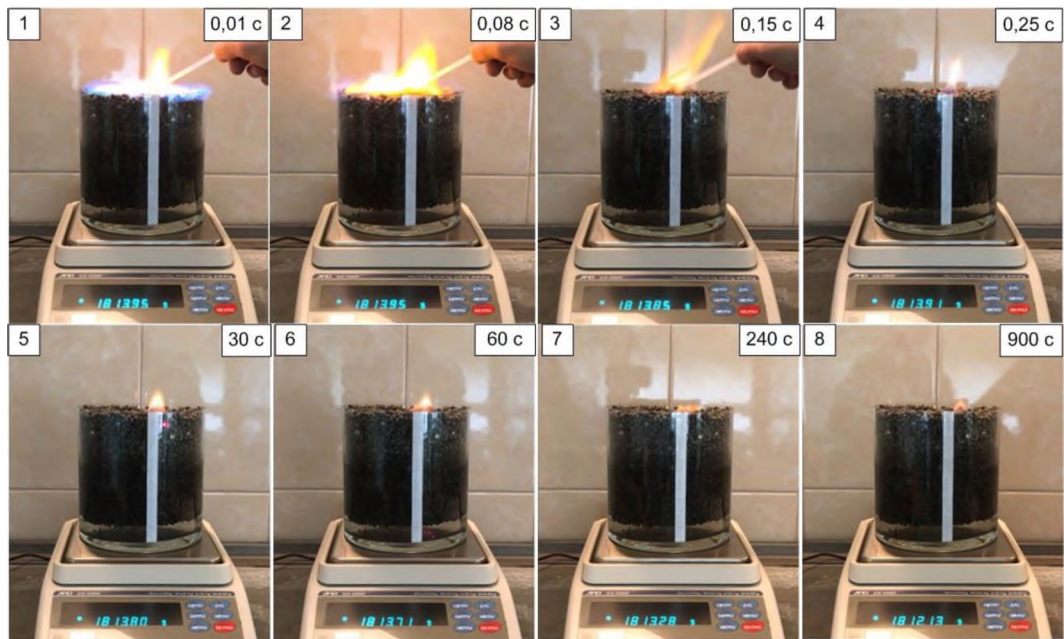


Рисунок 3.31– Последовательная серия кадров вспышки и последующего горения гексана в емкости с СПП на весах

Последовательная серия кадров вспышки без последующего горения ацетона в емкости с СПП высотой 8 см представлена на Рисунке 3.32.

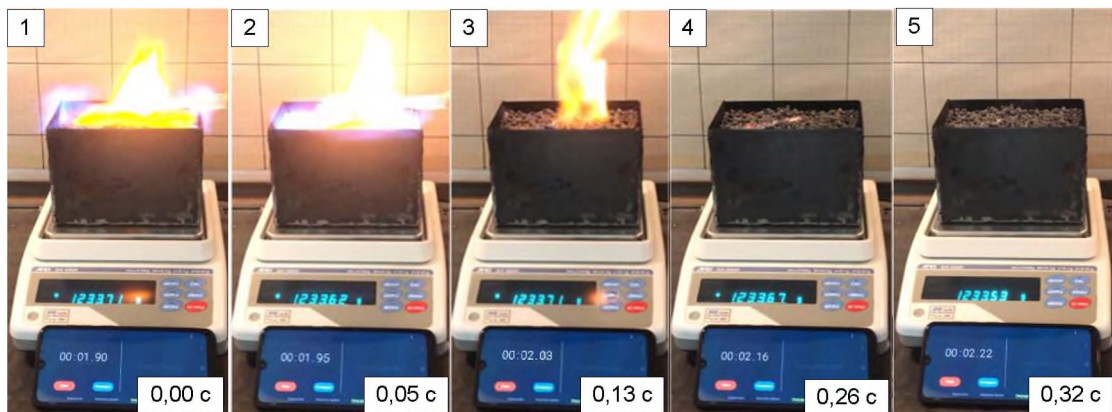


Рисунок 3.32 – Последовательная серия кадров вспышки без последующего горения ацетона в емкости с СПП на весах

При сгорании паровоздушного облака зафиксирован «скачок» (относительно быстрое изменение массы Δm) на весах у ряда исследуемых ЛВЖ (ацетон, бензин АИ-92, гексан, этанол), что подтверждает выдвинутое предположение о перепаде давления, описанное в разделе 2.4. Время сгорания паровоздушной смеси, характерное существованию вспышки паров, т.е. от

начала инициирования горения до появления ламинарного пламени или прекращения горения, приблизительно равно значению $\tau_{\Delta p} \sim 0,23$ с (Таблица 3.9).

Изменение средней скорости горения v_z при различной высоте «сухого» СГП представлено на графике, Рисунок 3.33.

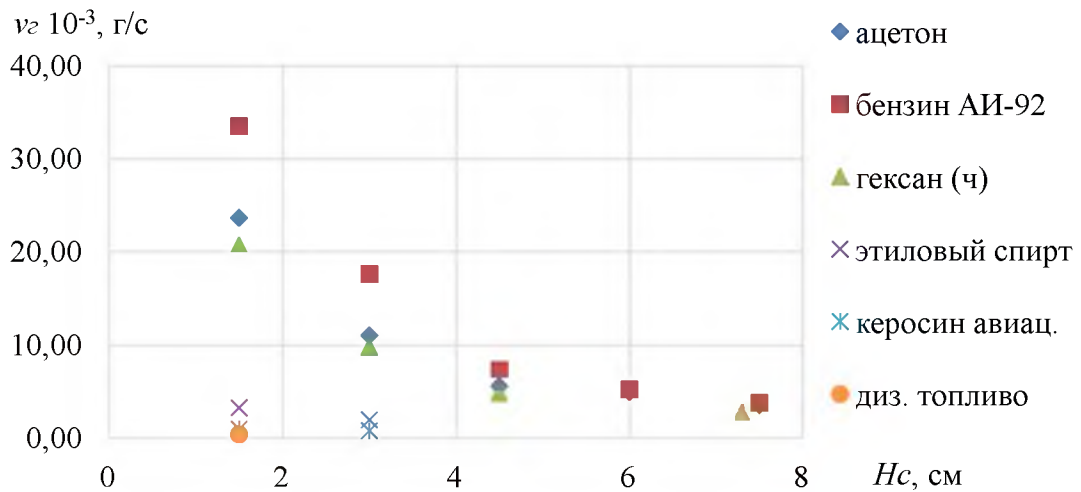


Рисунок 3.33 – Изменение средней скорости горения при различной высоте «сухого» СГП

Зависимость удельной массовой скорости выгорания жидкости от критической высоты «сухого» СГП представлена на графике, Рисунок 3.34.

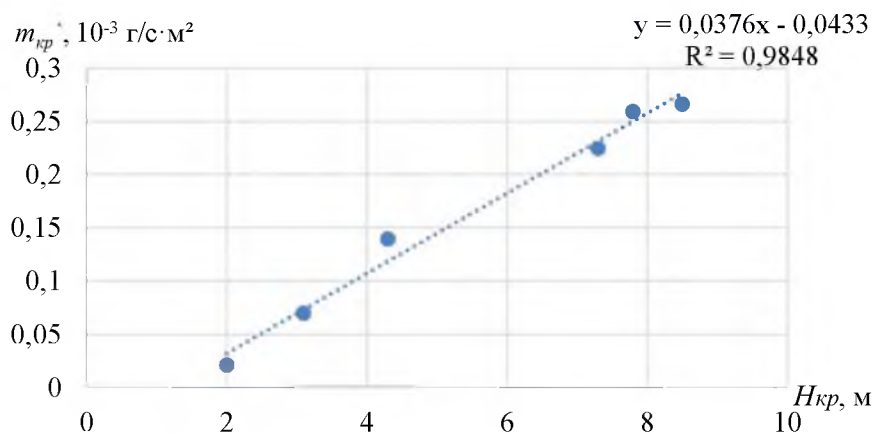


Рисунок 3.34 – Зависимость критической удельной массовой скорости выгорания углеводородных жидкостей от критической высоты «сухого» СГП

3.4 Результаты полигонных испытаний и их обсуждение с результатами лабораторных экспериментов

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 скорость горения жидкостей при экранировании пролива жидкости «сухим» СГП.

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 патрубка гранулами пеностекла. Размеры поддонов сведены в Таблицу 3.10.

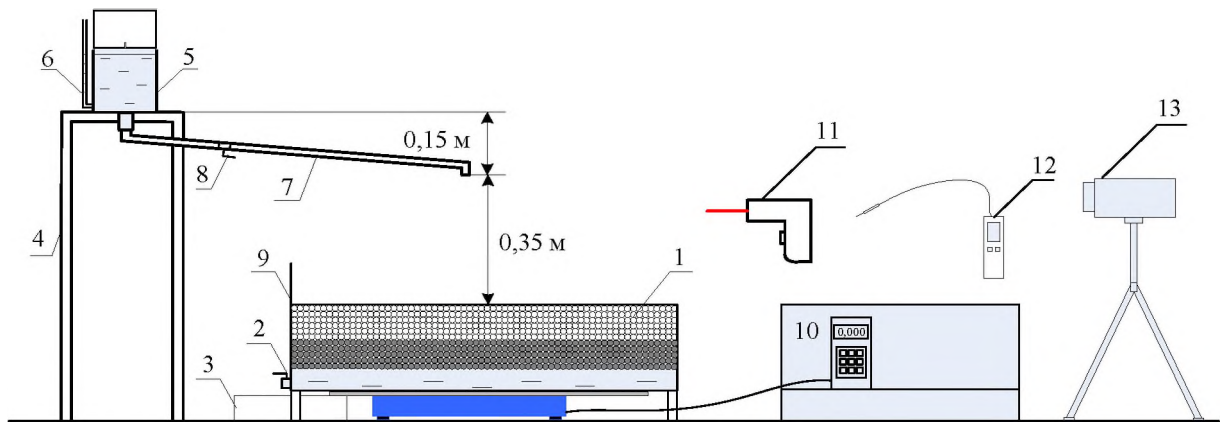
Таблица 3.10 – Размеры поддонов для полигонных испытаний

Параметр	ЛЕ	М	П ₁	М	П ₂	М	П ₃	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
высота, м	0,05 -0,25	-	0,25	-	0,27	-	0,27	-
площадь S, м ²	0,018	1:1	0,35	1:19,9	1,01	1:57,5	1,50	1:85,5

Примечание: ЛЕ – лабораторная емкость; П₁, П₂, П₃ – поддоны для полигонных испытаний; М – масштаб.

В качестве экранирующего материала использовалось гранулированное пеностекло марки «Термоизол» фракции Ф5-7 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

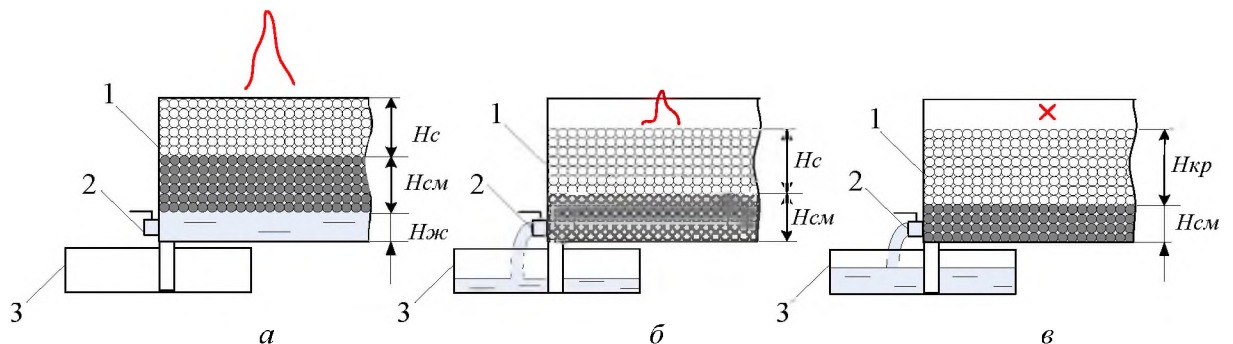
дискретностью отсчета – 0,01 с. Схема полигонного экспериментального стенда представлена на Рисунке 3.35.



1 – поддон с СГП; 2 – сливной патрубком 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 3.35 – Схема полигонного экспериментального стенда для исследования параметров гашения пламени локальных проливов ЛВЖ

Схема определения критической высоты «сухого» СГП представлена на Рисунке 3.36.



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

Рисунок 3.36 – Схема определения критической высоты «сухого» СГП методом слива углеводородной жидкости

Оборудование для проведения полигонного эксперимента в помещении по определению высоты «сухого» СГП, при которой достигается эффект гашения пламени представлено на Рисунке 3.37.



Рисунок 3.37 – Оборудование для проведения эксперимента в помещении

Оборудование для проведения полигонного эксперимента аналогично тому, что использовалось при проведении крупномасштабного эксперимента, при этом СГП размещался в поддонах площадью 1 м^2 и $1,5 \text{ м}^2$, Рисунок 3.38.



Рисунок 3.38 – Оборудование для проведения полигонного эксперимента

В поддон-приемник со сливным краном насыпался СГП марки «Термоизол» фракции 5-7 мм в количестве, при котором H_c соответствует

средним значениям лабораторного эксперимента, приведенным в Таблице 3.6. По трубопроводу из емкости для ЛВЖ с мерной трубкой, расположенной на станине, на СГП наливалась углеводородная жидкость в центр поддона-приемника. Высота разлива уровня жидкости вначале испытания составляла 1 см, затем производились измерения убыли массы ЛВЖ в течение 15 минут (с шагом 1 минута), далее от лучины паровоздушная смесь поджигалась и измерялась скорость горения жидкости. Затем высоту СГП увеличивали и эксперимент повторяли до момента фиксации гашения пламени после чего измеряли критическую высоту «сухого» СГП $H_{кр}$ металлической линейкой (щупом). Эксперимент повторялся в условиях равновесного положения СГП при повышении уровня углеводородной жидкости, при котором нижний срез СГП был выше дна поддона-приемника на 1 см при этом $H_c = H_{кр}$. Измерения уровня ЛВЖ в поддоне проводилось с помощью линейки (щупа). Эксперимент повторялся пять раз для каждой исследуемой углеводородной жидкости. Температурные поля пламени регистрировались тепловизором *Fluke Ti20*. Контроль температуры и скорости движения воздуха у поддона-приемника проводился электронным термоанемометром *Testo 425*. Температура в помещении и на полигоне составляла $+21\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($\pm 0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$) и скорость воздуха $0,0 - 0,5\text{ м/с}$, относительная влажность воздуха 40-60 %.

Максимальные геометрические размеры вспышки были зарегистрированы при проведении эксперимента в помещении при отсутствии равновесного положения и соблюдении условия $H_c = H_{кр}$. Это связано с препятствием движению паров ЛВЖ стенками поддона-приемника и сосредоточению массы, испарившейся ЛВЖ над СГП внутри поддона.

Последовательная серия кадров воспламенения паров бензина АИ-92 и последующего гашения пламени при экранировании поверхности пролива СГП в поддоне площадью $0,35\text{ м}^2$ представлена на Рисунке 3.39.

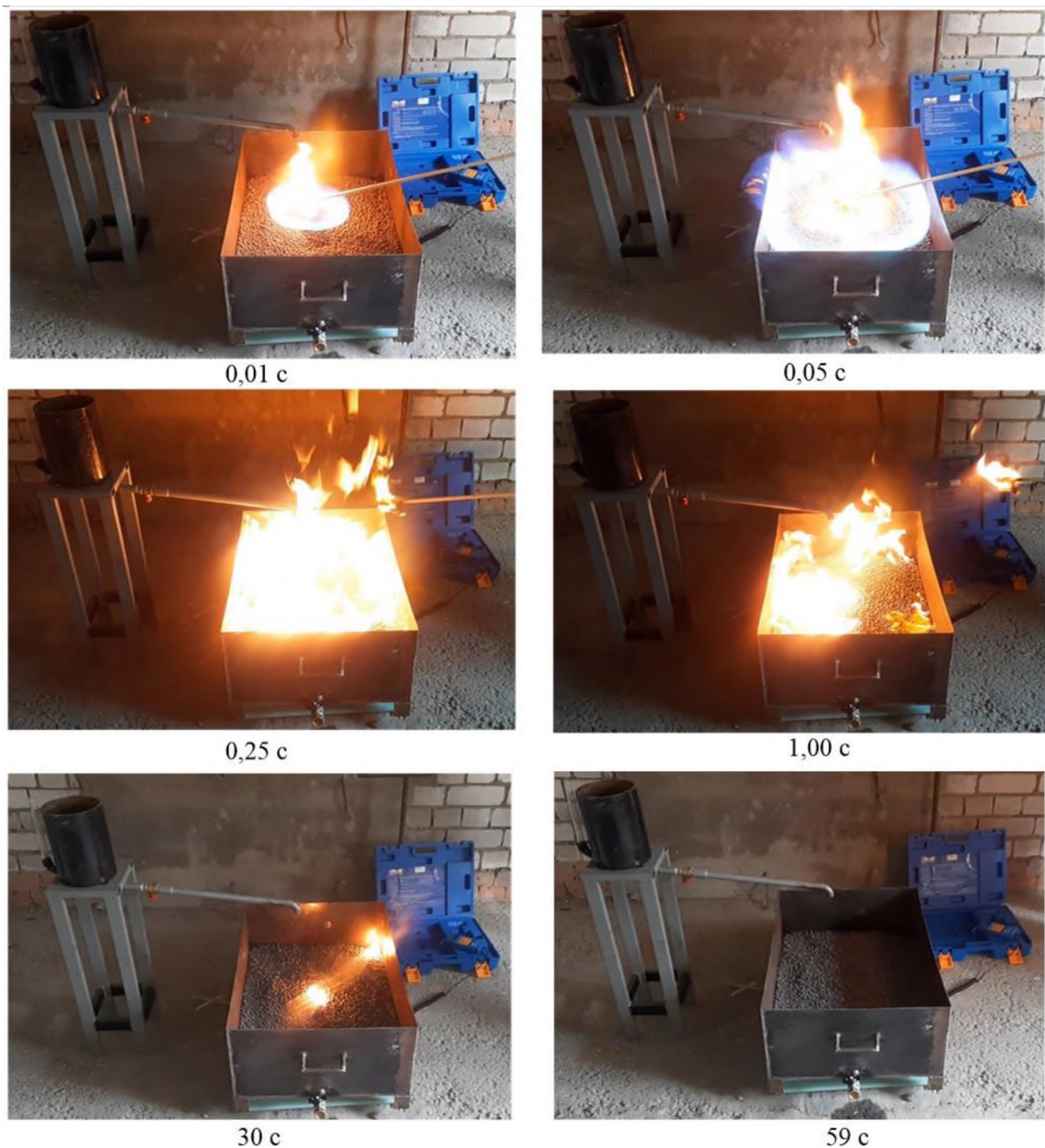


Рисунок 3.39 – Серия кадров вспышки паров бензина АИ-92 и последующего гашения пламени при экранировании поверхности пролива СГП в поддоне площадью $0,35 \text{ м}^2$

Время с момента воспламенения паров до полного гашения пламени при значении $H_{кр}$ для исследуемых ЛВЖ варьировалось от 18 до 90 секунд. Время выгорания ЛВЖ с площади смоченной поверхности гранул зависит от удельной массовой скорости выгорания жидкости. В 2х из 30 опытов ($\sim 6,7\%$) наблюдался «краевой» эффект горения в углах поддона-приемника, при этом высота пламени не превышала 5 см. Термограмма, снятая тепловизором, и оптическое изображение выгорания бензина АИ-92 на СГП с «краевым» эффектом представлены на Рисунке 3.40.

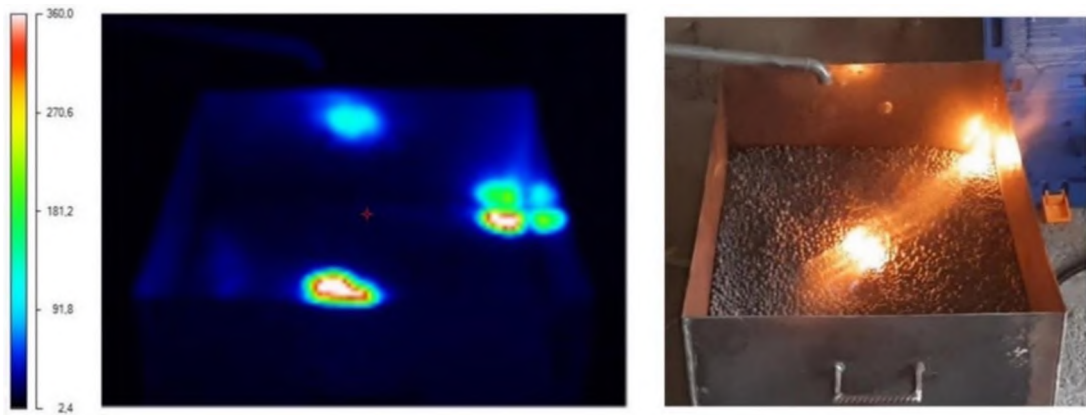


Рисунок 3.40 – Термограмма и оптическое изображение выгорания бензина АИ-92 на СГП с «краевым» эффектом

При горении капельной утечки ЛВЖ (расход $q \sim 0,25$ л/мин и высота падения струи $h \sim 0,5$ м) наблюдалось поддержание горения на участке падения струи при этом высота пламени не превышала 5 см, Рисунке 3.41.



Рисунок 3.41 – Горение капельной утечки ЛВЖ в поддоне приемнике с СГП

Последовательная серия кадров гашения пламени при истечении гексана из трубопровода на СГП, находящегося в равновесном состоянии в поддоне площадью $1,5 \text{ м}^2$ представлена на Рисунке 3.42.

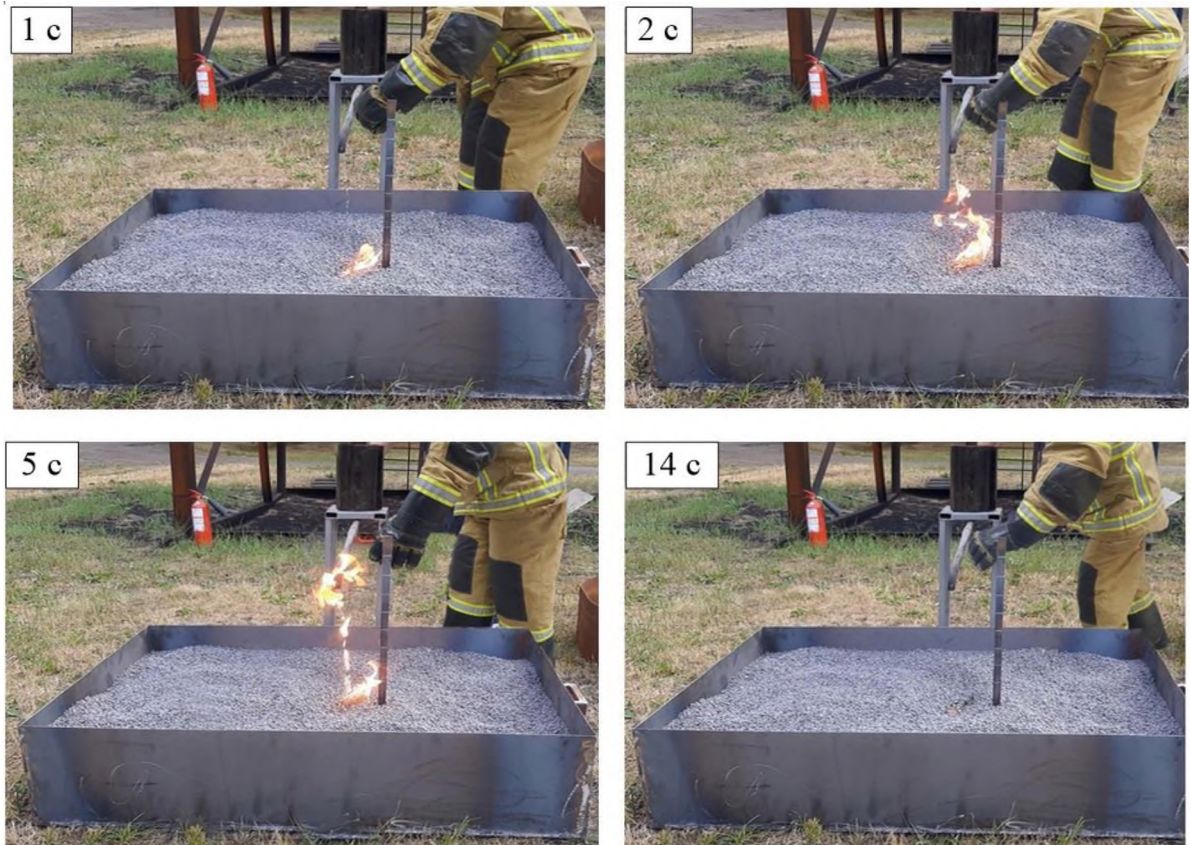


Рисунок 3.42 – Серия кадров гашения пламени при истечении гексана из трубопровода на СГП, находящегося в равновесном состоянии в поддоне площадью 1,5 м²

3.4.1 Анализ экспериментальных данных критической высоты «сухого» слоя гранулированного пеностекла

Осредненные результаты полигонного и лабораторного эксперимента по определению критической высоты «сухого» СГП, при которой происходит гашение пламени углеводородной жидкости $H_{кр}$, расчетные значения общей высоты «сухого» слоя H , а также осредненные экспериментальные значения критической удельной массовой скорости выгорания жидкости (при $H_c = H_{кр}$) $m'_{кр}$, интенсивности испарения жидкости W' (при $H_c = H_{кр}$) и удельной массовой скорости выгорания жидкости m' [9] сведены в Таблицу 3.11.

Таблица 3.11 – Критическая высота «сухого» СГП, при которой происходит гашение пламени $H_{кр}$

Параметры		Бензин	Ацетон	Гексан	Этанол	Керосин	ДТ
$F_{п} = 0,018 \text{ м}^2$	$H_{кр}, \text{ м}$	0,085	0,078	0,073	0,043	0,031	0,020
	$H, \text{ м}$	0,140	0,129	0,130	0,062	0,050	0,037
$F_{п} = 0,35 \text{ м}^2$	$H_{кр}, \text{ м}$	0,114	0,110	0,102	0,052	0,039	0,030
	$H, \text{ м}$	0,204	0,188	0,188	0,089	0,070	0,051
$F_{п} = 1,00 \text{ м}^2$	$H_{кр}, \text{ м}$	0,123	0,122	0,108	0,052	0,041	0,032
	$H, \text{ м}$	0,222	0,204	0,204	0,097	0,076	0,055
$F_{п} = 1,50 \text{ м}^2$	$H_{кр}, \text{ м}$	0,132	0,129	0,111	0,054	0,044	0,033
	$H, \text{ м}$	0,228	0,210	0,210	0,100	0,078	0,056
$m'_{кр} \cdot 10^{-4}, \text{ кг/ м}^2 \cdot \text{ с}$		2,7	2,6	2,2	1,4	1,0	0,6
$m' \cdot 10^{-2}, \text{ кг/ м}^2 \cdot \text{ с} [9]$		5,6	5,9	10,3	3,7	4,8	4,0
$W' \cdot 10^{-6}, \text{ кг/ м}^2 \cdot \text{ с}$		2,5	2,5	2,2	1,4	0,9	0,6

Примечание: результаты оценки $H_{кр}$ и расчет погрешности результатов измерений сведен в приложение Д. Погрешность результатов измерений не превышает 10 %.

Результаты расчета времени «перепада давления» $\tau_{\Delta p}$, критической высоты «сухого» СГП $H_{кр}$, общей высоты СГП H в равновесном состоянии, при которой достигается эффект гашения пламени, для различной площади поддона, а также обработка расчетных и экспериментальных значений показателя $H_{кр}$ методом наименьших квадратов описываемых линейной зависимостью с функцией $y = ax + b$ сведены в приложение Е.

Экспериментальные и расчетные зависимости критической высоты «сухого» СГП от параметра x для различной площади поддона представлены на Рисунках 3.43 – 3.45.

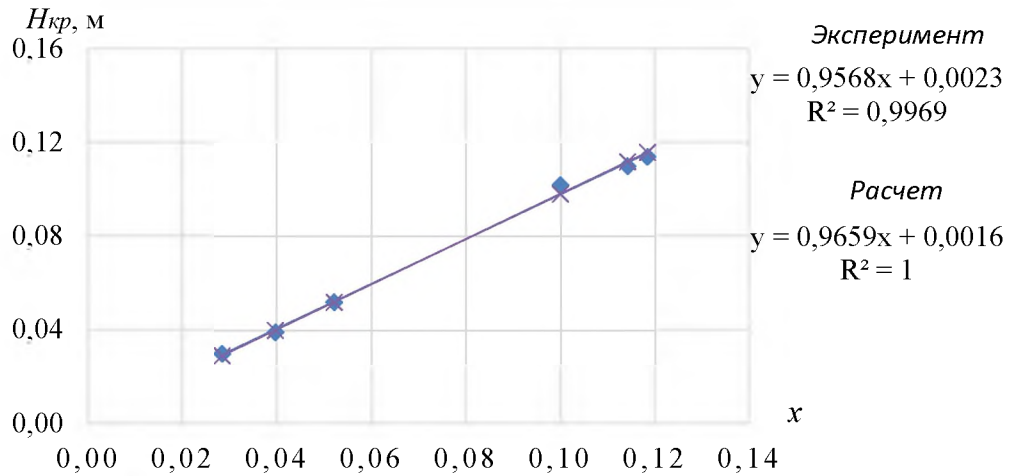


Рисунок 3.43 – Зависимость критической высоты «сухого» СГП от параметра x для поддона площадью $0,35 \text{ м}^2$

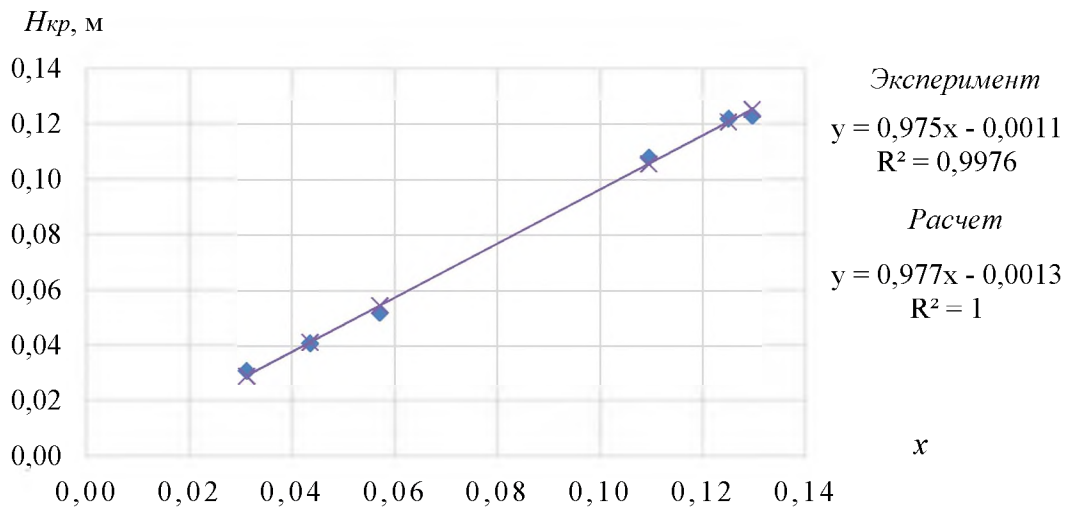


Рисунок 3.44 – Зависимость критической высоты «сухого» СГП от параметра x для поддона площадью $1,00 \text{ м}^2$

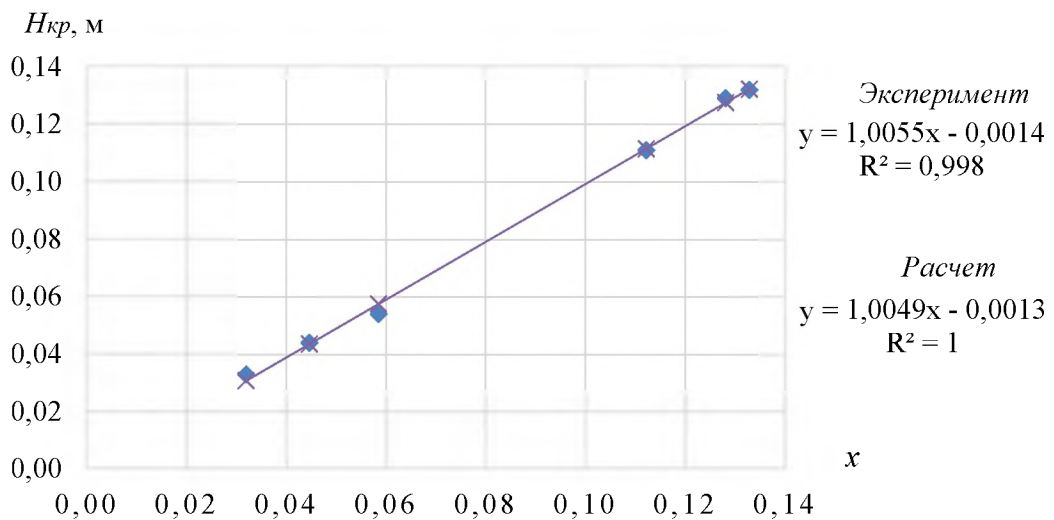


Рисунок 3.45 – Зависимость критической высоты «сухого» СГП от параметра x для поддона площадью $1,50 \text{ м}^2$

Зависимость расчетных значений критической высоты «сухого» СГП от параметра x представлена на графике, Рисунок 3.46.

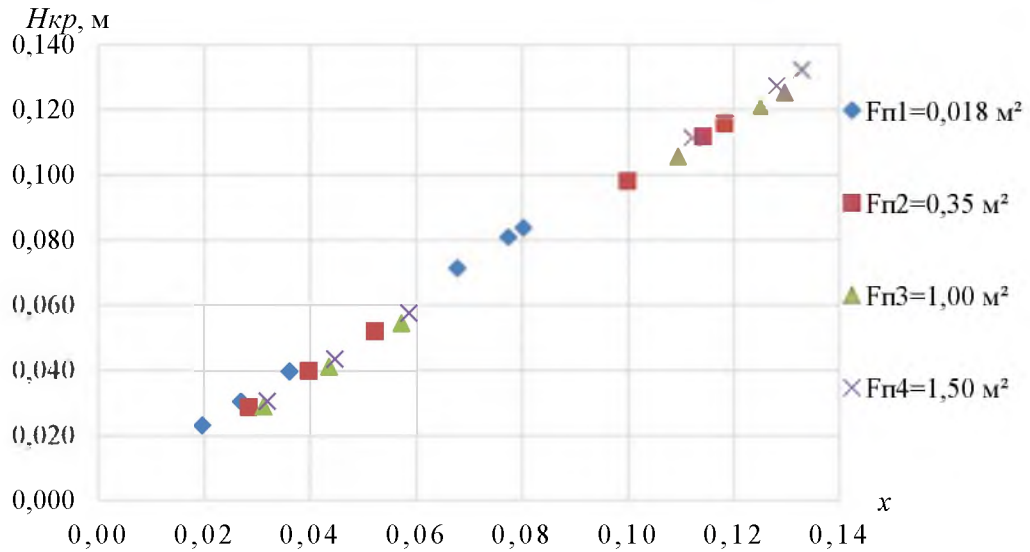


Рисунок 3.46 – Зависимость расчетных значений критической высоты «сухого» СГП от параметра x

Кросс-плот расчетных и экспериментальных значений критической высоты «сухого» СГП для общей многопараметрической зависимости представлен на графике, Рисунок 3.47.

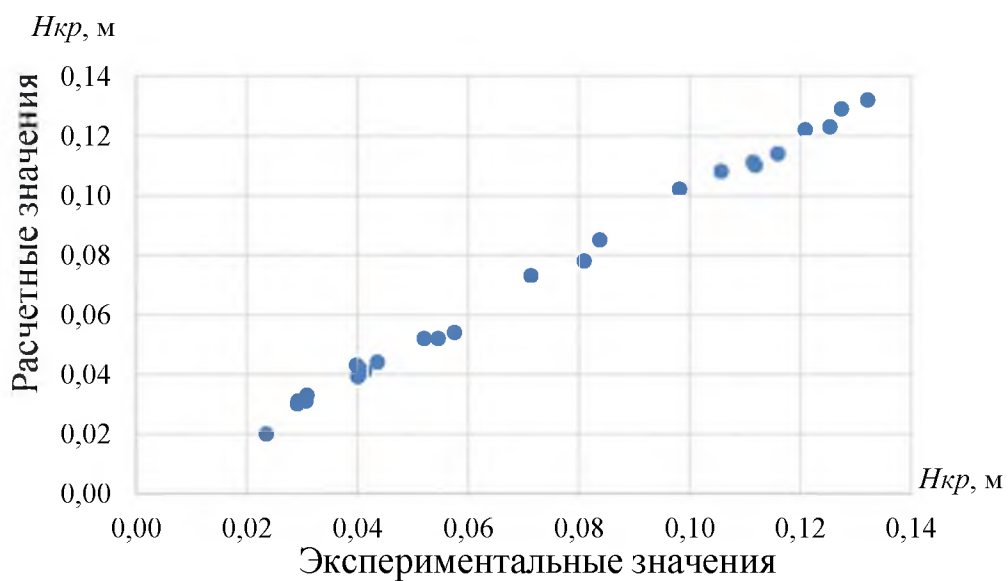
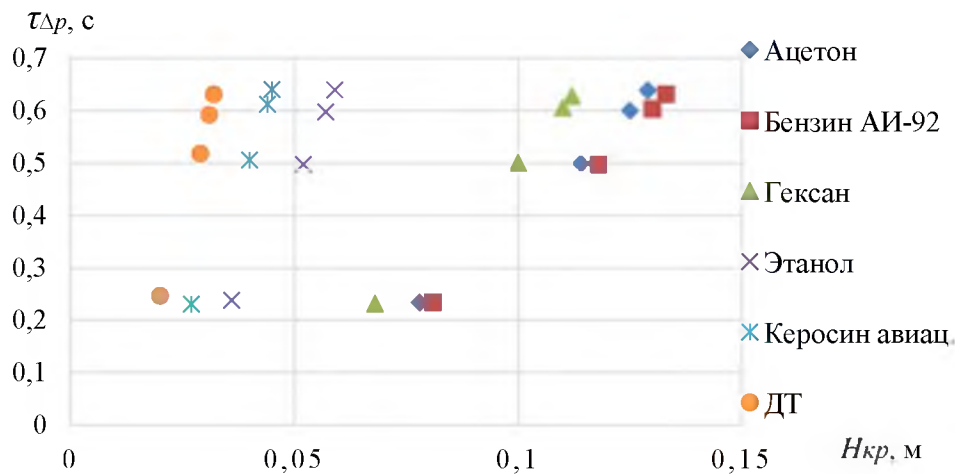


Рисунок 3.47 – Кросс-плот расчетных и экспериментальных значений критической высоты «сухого» СГП

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.

Зависимость времени «перепада давления» (2.44) от критической высоты «сухого» СГП приведена на Рисунке 3.48.



Зависимость осредненной величины времени «перепада давления» от площади поддона, является логарифмической с коэффициентом детерминации 0,99. Распределение критической высоты «сухого» СГП для различной площади поддона приведена на Рисунке 3.50.

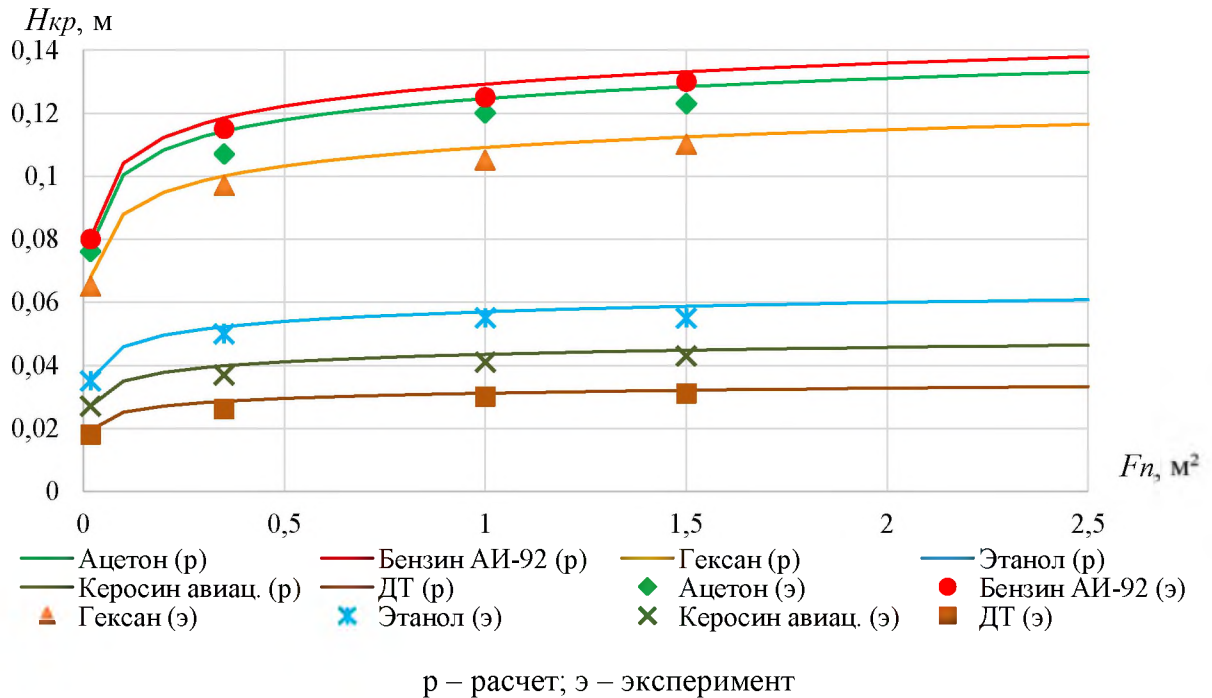


Рисунок 3.50 – Распределение критической высоты «сухого» СГП от площади поддона

Общую высоту СГП с учетом высоты капиллярного подъема углеводородной жидкости h_k можно определить по формуле

$$H = \frac{H_{кр} + h_k}{1 - \frac{\rho_g}{\rho_{жс} \cdot (1 - m)}} \quad (3.12)$$

Распределение расчетных значений общей высоты СГП H в равновесном состоянии, при которой достигается эффект гашения пламени для различной площади поддона, представлено на графике, Рисунок 3.51.

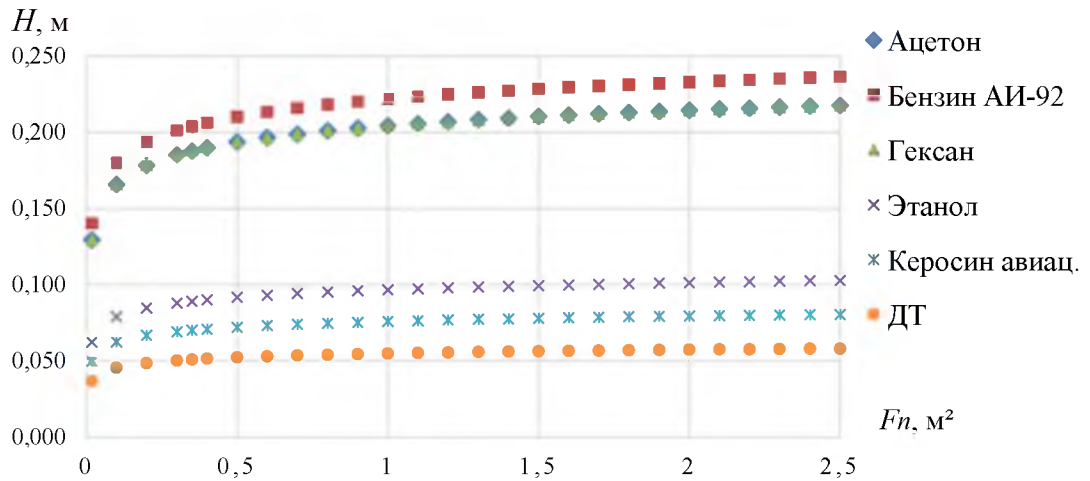


Рисунок 3.51 – Распределение общей высоты СГП в равновесном состоянии для различной площади поддона

Значения $H_{кр}$ при площади поддона до $0,25 \text{ м}^2$ значительно увеличиваются, затем рост данных значений замедляется, что обуславливается выравниванием величины времени «перепада давления» при быстром сгорании паров ЛВЖ.

3.4.2 Анализ экспериментальных данных критической скорости выгорания и испарения углеводородных жидкостей

Результаты экспериментальной оценки интенсивности испарения при условии $H_c = H_{кр}$ и критической удельной массовой скорости выгорания углеводородных жидкостей представлены в приложении Ж.

Распределение критической удельной массовой скорости выгорания углеводородных жидкостей в зависимости от параметра x представлено на графике, Рисунок 3.52.

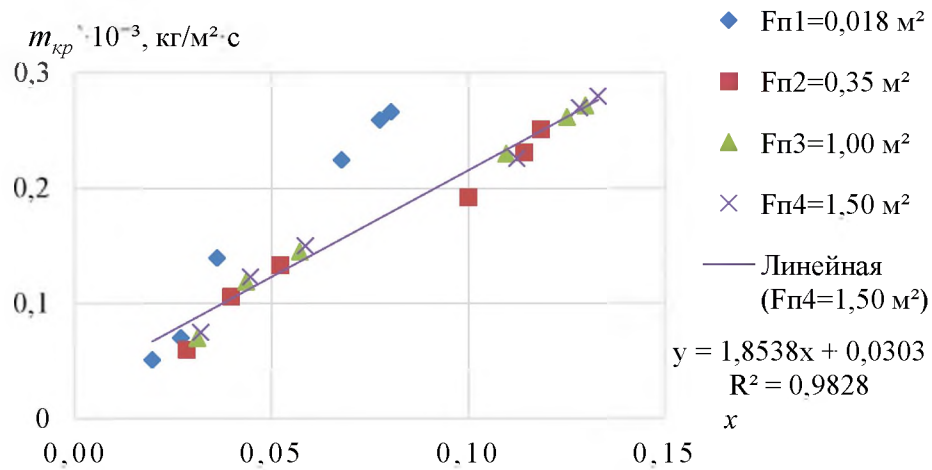


Рисунок 3.52 – Распределение критической удельной массовой скорости выгорания углеводородных жидкостей в зависимости от параметра x

Распределение интенсивности испарения углеводородных жидкостей в зависимости от критической высоты «сухого» СГП, при котором горение не поддерживается представлено на графике, Рисунок 3.53.

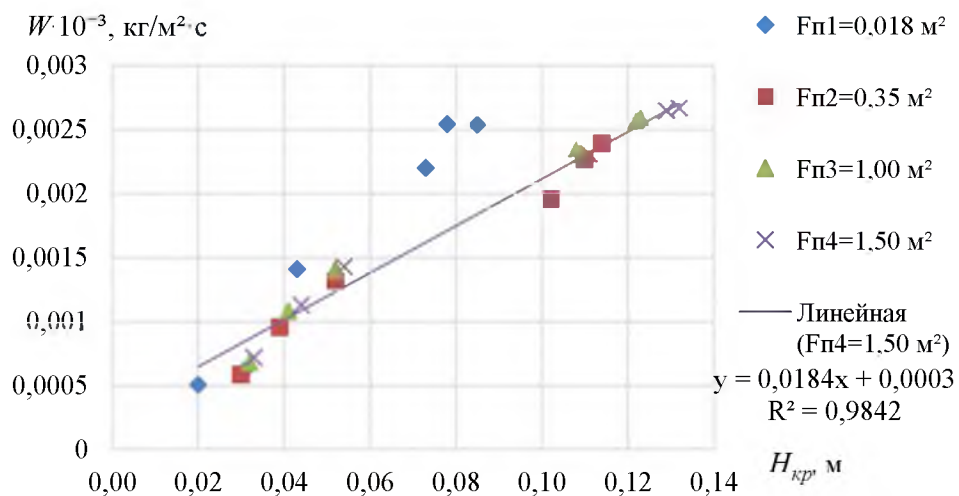


Рисунок 3.53 – Распределение интенсивности испарения углеводородных жидкостей в зависимости от критической высоты «сухого» СГП

Анализ результатов экспериментальной оценки интенсивности испарения при условии $H_c = H_{кр}$ и критической удельной массовой скорости выгорания углеводородных жидкостей показал, что данные параметры зависят от давления насыщенных паров жидкостей и хорошо описываются степенной функцией, Рисунки 3.54 и 3.55 соответственно.

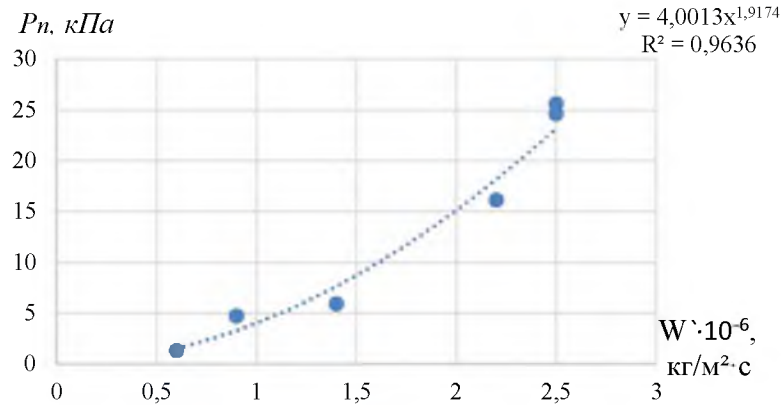


Рисунок 3.54 – Зависимость интенсивности испарения при условии $H_c = H_{кр}$ от давления насыщенных паров жидкостей

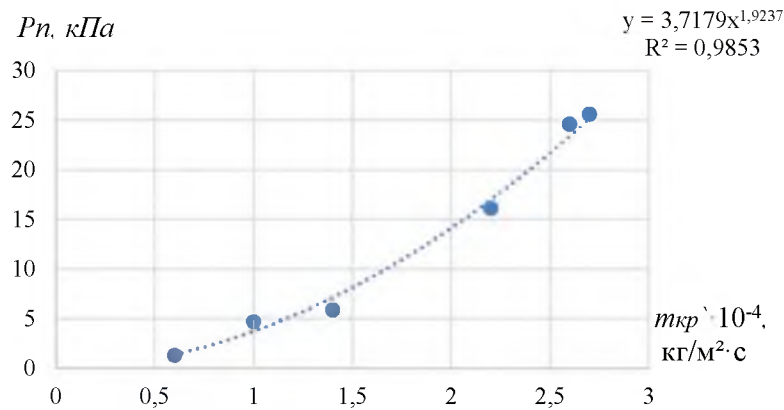


Рисунок 3.55 – Зависимость критической удельной массовой скорости выгорания от давления насыщенных паров жидкостей

По результатам анализа и обработки экспериментальных данных по методу наименьших квадратов были получены зависимости критической удельной массовой скорости выгорания от свойств жидкости, свойств СГП, временного показателя градиента давления, а также зависимости критической высоты «сухого» СГП от интенсивности испарения жидкостей при условии $H_c = H_{кр}$ для поддонов площадью 0,35; 1,00; 1,50 м. Результаты полученных зависимостей представлены в приложении Ж сведены в Таблицу 3.12.

Таблица 3.12 – Результаты полученных зависимостей

Площадь поддона $F_n, \text{ м}^2$	Критическая удельная массовая скорость выгорания $m_{кр} \cdot 10^{-4}, \text{ кг/м}^2 \cdot \text{с}$	Критическая высота «сухого» СГП $H_{кр}, \text{ м}$	Интенсивность испарения при условии $H_c = H_{кр}$ $W \cdot 10^{-6}, \text{ кг/м}^2 \cdot \text{с}$
0,35	$m_{кр} = 1,8449x + 0,0229$ (3.13)	$H_{кр} = \frac{W - 0,0002}{0,019}$ (3.16)	$W = 1,9174 \sqrt{\frac{P_n}{4,0013}}$ (3.19)
1,00	$m_{кр} = 1,8927x + 0,0265$ (3.14)	$H_{кр} = \frac{W - 0,0002}{0,0194}$ (3.17)	
1,50	$m_{кр} = 1,8538x + 0,0303$ (3.15)	$H_{кр} = \frac{W - 0,0003}{0,0184}$ (3.18)	

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 критическая удельная массовая скорость выгорания жидкости может определяться по расчетной формуле интенсивности испарения жидкостей при выполнении условия $H_c = H_{кр}$.

3.5 Методика определения геометрических параметров слоя гранулированного пеностекла, обеспечивающего гашение пламени углеводородных жидкостей в поддонах для сбора локальных проливов, и рекомендации по их применению

Методика определения геометрических параметров слоя гранулированного пеностекла, обеспечивающего гашение пламени углеводородных жидкостей в поддонах для сбора локальных проливов (далее – Методика) разработана на основе теоретических исследований испарения углеводородных жидкостей, гашения пламени в условиях экранирования пролива СГП и анализа экспериментальных данных лабораторного и полигонного экспериментов.

Методика позволяет определять геометрические параметры СГП, обеспечивающего гашение пламени горючих жидкостей в поддонах для сбора

локальных проливов горючих жидкостей. При малочисленных утечках жидкости СГП находится в поддоне в стационарном положении, при увеличении уровня жидкости слой гранул поднимается под действием архимедовой силы и переходит в равновесное состояние, образуя «сухой» слой над поверхностью жидкости, критическую (минимальную) высоту которого, а также общую высоту слоя гранул, необходимого для гашения пламени можно рассчитать по разработанной Методике. В расчетах общей высоты «сухого» СГП учитывается капиллярный подъем уровня жидкости. По Методике можно определить минимальную высоту поддона с учетом максимального объема ожидаемой утечки жидкости, а также свободный объем поддона с учетом геометрических параметров СГП, а также проверить условие, при котором максимальный объем жидкости превышает свободный объем поддона с гранулами пеностекла, на основании последнего сделать вывод о необходимости оснащения поддона сливным патрубком с трубопроводом для отведения жидкости в аварийную емкость.

Методика расчета

1. Расчет критической высоты «сухого» слоя гранулированного пеностекла:

$$H_{кр} = \sqrt{\frac{2 \cdot k \cdot P_n}{m \cdot \mu} \cdot \tau_{\Delta p}} \quad (3.13)$$

где k – коэффициент проницаемости; P_n – давление насыщенного пара, Па; μ – динамическая вязкость пара, Па · с; m – пористость; $\tau_{\Delta p}$ – время «перепада давления», с.

2. Расчет времени «перепада давления»:

$$\tau_{\Delta p} = 0,0907 \ln(F_n) + 0,5961 \quad (3.14)$$

F_n – площадь поддона, м².

3. Расчет общей высоты СГП для поддона по формуле (3.12):

$$H = \frac{H_{кр} + h_k}{1 - \frac{\rho_z}{\rho_{жс} \cdot (1 - m)}}$$

где $\rho_{ж}$ – плотность жидкости, кг/м³; ρ_2 – насыпная плотность гранул, кг/м³; h_k – высота капиллярного подъема уровня жидкости м.

4. Расчет высоты капиллярного подъема уровня жидкости по формуле (2.84):

$$h_k = \frac{2 \cdot \sigma}{g \cdot \rho_{ж} \cdot d_э}$$

где σ – поверхностное натяжение, мН/м; g – ускорение свободного падения, м/с²; $d_э$ – эквивалентный диаметр канала, м.

5. Расчет высоты (минимальной) поддона:

$$H_n = 1,2 \cdot H \quad (3.15)$$

6. Расчет необходимого объема гранул пеностекла:

$$V_2 = F_n \cdot H \quad (3.16)$$

7. Расчет свободного объема поддона (за исключением критической высоты «сухого» слоя гранулированного пеностекла):

$$V_{св} = F_n(1,2 \cdot H - H) + (H - H_{кр}) \cdot F_n \cdot m \quad (3.17)$$

8. Определение максимального объема жидкости при аварийной утечке:

$$V_{ж}^{max} = \tau \cdot q \quad (3.18)$$

τ – время необходимое для устранения утечки, мин; q – расход жидкости, м³ · мин.

9. Проверка условия необходимости оборудования поддона сливным патрубком с трубопроводом для отведения жидкости в аварийный резервуар:

$$V_{ж}^{max} > V_{св} \quad (3.19)$$

$V_{св}$ – свободный объем поддона, м³; $V_{ж}^{max}$ – максимальный объем жидкости при аварийной утечке, м³.

Рекомендации

Площадь поддона должна выбираться исходя из особенностей геометрических параметров площадки, расположенной под технологическим

оборудованием, на котором возможны утечки горючих жидкостей, но не более 2,5 м².

Поверхность, на которую устанавливают поддон с гранулированным слоем пеностекла, должна быть твердая и ровная. После устранения причин, приводящих к утечкам (проливам) горючих жидкостей, поддон с СГП необходимо закрыть крышкой из искробезопасного материала для предотвращения испарения горючих жидкостей.

Поддоны с СГП для сбора локальных проливов горючих жидкостей необходимо оснащать сливным патрубком с запорной арматурой. Сливной патрубок необходимо располагать в нижней части с торца поддона и оснащать фильтром для предотвращения утечки гранул пеностекла. Площадь сечения сливного патрубка должна обеспечивать своевременный отвод жидкости во избежание перелива жидкости через край поддона. Сливной трубопровод должен иметь уклон не менее 2% на 1 м трубы.

По мере загрязнения слоя гранул пеностекла мусором и вязкими горючими жидкостями их необходимо просеивать через сито. Просеянные гранулы пеностекла можно использовать повторно после прокаливания в печи на заводе-изготовителе. Хранить и перевозить использованные гранулы пеностекла необходимо в полностью заполненных ими емкостях, закрытых крышками из искробезопасных материалов.

По Методике написана программа с помощью языка программирования *PHP* и библиотеки *jQuery*. Получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ (приложение 3).

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 м².

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.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. О предоставлении статистической информации по пожарам: Письмо ФГБУ ВНИИПО МЧС России от 31.01.2014 №408-11-6-02 // ФГБОУ ВО ИИ ГПС МЧС России. – 2014.
2. О предоставлении статистической информации по пожарам: Письмо ФГБУ ВНИИПО МЧС России от 10.08.2016 №115-34-59. // ФГБОУ ВО ИПСА ГПС МЧС России. – 2016.
3. Пожары и пожарная безопасность в 2019 году: статистический сборник под общей редакцией Д.М. Гордиенко [Текст]. – М.: ВНИИПО, 2020. – 80 с.
4. Ежегодные отчеты о деятельности Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.gosnadzor.ru/public/annual_reports/. (Дата обращения 09.09.2021 г.)
5. Ширяев, Е.В. Статистический анализ пожаров на объектах с обращением нефтепродуктов [Электронный ресурс] / Е.В. Ширяев, В.П. Назаров, А.В. Майзлиш, А.А. Гогин // Технологии техносферной безопасности. – 2014. – №3 (55). – 8 с. Режим доступа: <http://agps-2006.narod.ru/ttb/2014-3/33-03-14.ttb.pdf>. (Дата обращения 25.12.2020 г.)
6. Краснов, А.В. Статистика чрезвычайных происшествий на объектах нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности за 2007-2016 гг. [Электронный ресурс] / А.В. Краснов, З.Х. Садыкова, Д.Ю. Пережогин, И.А. Мухин // Нефтегазовое дело. – 2017. – №6. – С. 179-191. – Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=30784379> (Дата обращения 27.05.2021 г.)
7. Королев, Д.С. К вопросу обеспечения пожарной безопасности в нефтегазовой отрасли [Электронный ресурс] / Д.С. Королев, А.В. Калач // Техносферная безопасность. – 2018. №4 (21). – С. 3–9. – Режим доступа:

<https://elibrary.ru/item.asp?id=36983910>. (Дата обращения 27.05.2021 г.)

8. Корольченко, А.Я. Процессы горения и взрыва [Текст] / А.Я. Корольченко. - М.: Пожнаука, 2007. – 266 с.

9. Корольченко, А.Я. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов и средства их тушения: справочное издание [Текст] / А.Я. Корольченко, Д.А. Корольченко. – М.: Ассоциация «Пожнаука», 2004. – Т. 1-2.

10. Печёркин, А.С. Фоновые показатели аварийности - индикаторы эффективности введения инструментов регулирования промышленной безопасности [Текст] / Печёркин А.С., Гражданкин А.И. // Безопасность труда в промышленности. – 2017. – № 5. – С. 5-8.

11. ГОСТ 31610.10-2012 / ИЕС 60079-10:2002 Электрооборудование для взрывоопасных газовых сред. Часть 10. Классификация взрывоопасных зон. – М.: Стандартиформ, 2019. – 46 с.

12. Технический регламент о требованиях пожарной безопасности [Текст]: Федеральный закон: принят Гос. Думой 4 июля 2008 г. № 123-ФЗ // Рос. Газета. – 2008. – 1 августа. Федеральный выпуск № 4720 – полоса 18.

13. Методика определения расчетных величин пожарного риска на производственных объектах. Утв. приказом МЧС России от 10 июля 2009 г. №404 «Об утверждении методики определения расчетных величин пожарного риска на производственных объектах» зар. в Минюсте от 17 августа 2009 г. № 14541, с изм. и доп. от 14 декабря 2010 г.

14. СП 13.13130.2009 Атомные станции. Требования пожарной безопасности (с Изм. №1) [Электронный ресурс]: свод правил // Гарант: ИПО – Электрон. Дан. – М., 2021. – Доступ из локальной сети б-ки ИПСА ГПС МЧС России.

15. Обеспечение пожарной безопасности установок по ликвидации аварийных проливов нефти и нефтепродуктов: рекомендации. – М.: ВНИИПО, 2008. – 82 с.

16. Постановление Правительства РФ от 16.09.2020 №1479 «Об утверждении Правил противопожарного режима в Российской Федерации»:

[Электронный ресурс]: свод правил // Гарант: ИПО – Электрон. Дан. – М., 2021. – Доступ из локальной сети б-ки ИПСА ГПС МЧС России.

17. Правила устройства электроустановок [Текст]. 7-е изд. – М.: НЦ ЭНАС, 2004.

18. ГОСТ Р 12.3.047.2012. Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Пожарная безопасность технологических процессов. Общие требования. Методы контроля. – М.: Стандартинформ, 2019. – 62 с.

19. СП 155.13130.2014. Склады нефти и нефтепродуктов. Требования пожарной безопасности [Электронный ресурс]: свод правил // Гарант: ИПО – Электрон. Дан. – М., 2021. – Доступ из локальной сети б-ки ИПСА ГПС МЧС России.

20. СП 156.13130.2014. Станции автомобильные заправочные. Требования пожарной безопасности [Электронный ресурс]: свод правил // Гарант: ИПО – Электрон. Дан. – М., 2021. Доступ из локальной сети б-ки ИПСА ГПС МЧС России.

21. International Safety Guide for Oil Tankers and Terminals. (ISGOTT, Fifth Edition): Published and Printed by WITHERBY & CO. LTD. London EC1R 0ET, UK, 2007. 418 p.

22. Stormwater Management Regulations: National Pollutant Discharge Elimination System. 40 CFR 122.26 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.spillcontainment.com>.

23. Spill Prevention, Control, and Countermeasures Rule. 40 CFR 112. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://spillsolutionscanada.com>.

24. EPA Container Storage Regulation. 40 CFR 264.175 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.spillcontainment.com>.

25. Spill Prevention, Control and Countermeasure Act. Uniform Fire Code (UFC) 79.406 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://cotradeco.com>.

26. Зельдович, Я. Б. Теория предела распространения тихого пламени [Текст] / Я.Б. Зельдович // Журнал экспериментальной и теоретической физики. –1941. – Т. 11. – № 1. – С. 159–169.

27. Блинов, В.И. Исследование процесса горения нефтепродуктов в резервуарах различных диаметров: отчет [Текст] / В.И. Блинов, Г.Н. Худяков. – М.: ЭНИН АН СССР, 1955. – С. 48–155.
28. Павлов, П.П. Влияние размера резервуара на скорость выгорания и режима горения нефтей и нефтепродуктов [Текст] / П.П. Павлов // Вопросы горения и пожарной профилактики. Инф. сб. ШЮ-ЦНИИПО МВД СССР. – М.: МКХ РСФСР, 1957. – С. 31–39.
29. Spolding, D.V. Experiments of the burning and extinction of liquid fuel spheres / D.V. Spolding // Fuel. London. – 1953. – V.32 – № 2. – PP. 169–185.
30. Блинов, В.И. Диффузионное горение жидкостей [Текст] / В.И. Блинов, Г.Н. Худяков. – М.: Изд-во Акад. наук СССР, 1961. – 208 с.
31. Демидов, П.Г. Горение и свойства горючих веществ: учебное пособие [Текст] / П.Г. Демидов, В.С. Саушев. – М.: Высшая инженерная пожарно-техническая школа МВД СССР, 1975. – 280 с.
32. Патент РФ №2010111822/12, 26.03.2010 Устройство пожаротушения подавлением конвекции для горящих жидкостей [Текст] / В.И. Потякин, В.Ф. Коротких, В.В. Добриков [и др.]. Патент России №2442625 С2, 2012, Бюл. №5.
33. Коротких, В.Ф. Устройство для тушения горючих жидкостей. [Текст] / В.Ф. Коротких, В.В. Добриков, Н.М. Полознов, В.П. Цуприк // Пожарная техника и тушение пожаров: сб. науч. тр. ВНИИПО. – М.: ВНИИПО, 1988. – С. 112.
34. Потякин, В.И. Применение устройства самотушения для тушения проливов горючих жидкостей [Текст] / В.И. Потякин, В.Ф. Коротких, И.М. Гребенек // Пожарная техника и тушение пожаров: сб. науч. тр. – М.: ВНИИПО, 1989. – С. 110–118.
35. Коротких, В.Ф. Горение горючих жидкостей в вертикальных каналах [Текст] / В.Ф. Коротких, Ф.Ш. Хафизов, В.И. Потякин, И.П. Юминов // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2008. – №2(72). – С. 50–55.

36. Коротких, В.Ф. Разработка средств и методов пассивного пожаротушения нефтепродуктов при аварийных проливах [Текст]: дис. ... канд. техн. наук: 05.26.03 / Коротких Виталий Федорович. – Уфа, 2008. – 152 с.
37. Коротких, В.Ф. Применение новых технических средств тушения при ликвидации горения аварийных проливов жидкостей [Электронный ресурс] / В.Ф. Коротких, С.В. Коротких, Ф.Н. Сулейманов // Нефть и Газ Сибири. – 2015. – №4 (21). – Режим доступа: <http://sibgs.ru/journals/article/301>. (Дата обращения 23.01.2020).
38. Киселев, Я.С. О двух способах предотвращения горения в узких каналах [Текст] / Я.С. Киселев, О.А. Хорошилов, Ю.К. Потеряев // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. – 2009. – № 4. – С. 60–63.
39. А.с. 971358 СССР, Кл. А 62 С 3/12. Устройство для защиты оборудования от прогрессирующего пожара [Текст] / П.Г. Бондаренко, О.Н. Медведев, Я.С. Повзик [и др.]. – 3264200/29-12; заявл. 18.03.81; опубл. 07.11.82, Бюл. № 41. – С. 3.
40. А.с.1729521 СССР, Кл. А 62 С 3/06. Способ тушения полярных жидкостей [Текст] / Е.Я. Мокроусов, В.В. Агафонов, Ю.М. Сорокин. – 4695310/12; заявл. 23.05.89; опубл. 30.04.92, Бюл. №16. – С. 2.
41. А.с. 903493 СССР, М. Кл. Е. 03 F 5/10//Н 01 F 27.14. Маслоприемник [Текст] / В.В. Кононов, И.И. Лукин. – 2927012/24-07; заявл. 20.05.80; опубл. 07.02.82, Бюл. №5. – С. 3.
42. Patent EP A2 2730716 Nov.13, 2013. T. W. Mackintosh Modular fire prevention flooring // Patent EP2730716 A2, 2014.
43. Takeuchi, T. Burning Characteristics of a Combustible Liquid Soaked in Porous Beds / T. Takeuchi, T. Tsuruda, S. Ishizuka, T. Hirano // *3rd Symposium on Fire Safety Science*, Edinburgh, Scotland, July. – 1991. – PP. 405–414.
44. Marc, J. Assael. Fires, Explosions, and Toxic Gas Dispersions. Effects Calculation and Risk Analysis / Marc J. Assael, Konstantinos E. Kakosimos. CRC Press. – 2010. – 349 p.

45. Абдурагимов, И.М. Процессы горения: учебное пособие для вузов МВД СССР [Текст] / И.М. Абдурагимов, А.С. А.С. Андросов, Л.К. Исаева, Е.В. Крылов; под ред. И.М. Абдурагимова. – М.: ВИПТШ, 1984. – 268 с.
46. Блинов, В.И. О некоторых закономерностях диффузионного горения жидкостей [Текст] / В.И. Блинов, Г.Н. Худяков // Доклады Академии наук СССР. – 1957. – Т. 113. – №5. – С. 1094–1098.
47. Блинов, В.И. О трех режимах горения жидкостей в резервуарах [Текст] / В.И. Блинов, Г.Н. Худяков // Известия Академии наук СССР. Отделение технических наук. – 1956. – № 4. – С.115–121.
48. Маклаков, А.И. Изучение устойчивости открытых ламинарных диффузионных пламен [Текст]: дис. ... канд. физ.-матем. наук: 01.00.00 / Маклаков Александр Иванович. – Казань: Казанский Гос. Ун-т, 1955. – С. 22.
49. Маклаков, А.И. Колебания диффузионных пламен, возникающих при ламинарном истечении горючего [Текст] / А.И. Маклаков // Журнал физической химии. – 1956. – Т. 30. – №3. – С. 708.
50. Блинов, В.И. К вопросу о пульсациях диффузионных пламен [Текст] / В.И. Блинов // Инженерно-физический журнал. – 1959. – Т. 2. – № 6. – С. 48–52.
51. Зельдович, Я.Б. Предельные законы свободно восходящих конвективных потоков [Текст] / Я.Б. Зельдович // Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 1937. – Т. 7. – №12. – С. 74–77.
52. Блинов, В.И. О ламинарном горении жидкостей в резервуарах [Текст] / В.И. Блинов // Труды Ленинградского института авиационного приборостроения. – 1956. – №14. – С. 54–57.
53. Назаров, В.П. Тушение нефтепродуктов и полярных жидкостей в резервуаре диоксидом углерода твердым [Текст] / Назаров В.П., Филипчик М.В., Старков Н.Н. // Пожаровзрывобезопасность. – 2006. – Т.15. – №5. – С.82–85.

54. А.с. 1720939 СССР, В 65 D 88/34. Плавающее покрытие [Текст] / С.Н. Левин, А.Н. Сипливый – 4786122/13; заявл. 25.01.90; опубл. 23.03.92, Бюл. №11. – С. 3.
55. Шацких, Е.С. Применение гранулированного пеностекла в качестве покрытия зеркала испарения нефтяных резервуаров [Текст] / Е.С. Шацких, С.Н. Левин, В.М. Писаревский // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. – 2018. – №4. – С. 17–21.
56. ГОСТ 32496-2013. Заполнители пористые для легких бетонов. Технические условия. – М.: Стандартинформ, 2014. – 10 с.
57. ГОСТ 10832-2009. Песок и щебень перлитовые вспученные. Технические условия. – М.: Стандартинформ, 2011. – 18 с.
58. ГОСТ 12865-67. Вермикулит вспученный. [Переизд.] – М.: Ордена «Знак Почета» Издательство стандартов, 1987. – 5 с.
59. ГОСТ 33676-2015. Материалы и изделия из пеностекла теплоизоляционные для зданий и сооружений. Классификация. Термины и определения [Электронный ресурс]: гос. стандарт // Гарант: ИПО – Электрон. Дан. – М., 2021. – Доступ из локальной сети б-ки ИПСА ГПС МЧС России.
60. DIN EN 13055-2016 Lightweight aggregates. Beuth-Verlag: Berlin, Germany, 2016. – p. 58.
61. ГОСТ 25818-2017. Золы-уноса тепловых электростанций для бетонов. Технические условия. – М.: Стандартинформ, 2017. – 19 с.
62. ТУ 23.19.12-001-91978852-2018. Универсальный пористый материал термоизоляционный УПМ «Термоизол».
63. Лейбензон, Л.С. Движение природных жидкостей и газов в пористой среде [Текст] / Л.С. Лейбензон. – М.; Л.: Гостехиздат, 1947. – 244 с.
64. Баренблатт, Г.И. Теория нестационарной фильтрации жидкости и газа [Текст] / Г.И. Баренблатт, В.М. Ентов, В.М. Рыжик. – М.: Недра, 1972. – 288 с.

65. Баренблатт, Г.И. Движение жидкостей и газов в природных пластах [Текст] / Г.И. Баренблатт, В.М. Ентов, В.М. Рыжик. – М.: Недра, 1984 – 211 с.

66. Консейсао, А.А.да. Исследование капиллярного подъема нефти и нефтепродуктов в сорбенте «DULROMABSORB» [Текст] / А.А.да Консейсао, Н.А. Самойлов // Башкирский химический журнал.– 2007.– Т.14. – № 4. – С. 66–69.

67. Консейсао, А.А.да. Разработка новых сорбентов и адгезионных нефтесборщиков для сбора аварийных разливов углеводородов [Текст]: автореф. дис....д-ра техн. наук: 03.00.16 / Консейсао Аугусто Агостино да. – Уфа: Уфим. гос. нефтяной техн. ун-т., 2008. – 34 с.

68. Коган, В.Е. Стеклообразные пеноматериалы неорганической и органической природы и перспективы очистки окружающей среды от загрязнений нефтью и нефтепродуктами [Текст] / В.Е. Коган // Записки Горного института. – 2016. – Т. 218. – С. 331–338.

69. Хейфец, Л.И. Многофазные процессы в пористых средах [Текст] / Л.И. Хейфец, А.В. Неймарк. – М.: Химия, 1982. – 320 с.

70. Кузнецов, Д.М. Экспериментальное изучение температурной зависимости капиллярного движения жидкости в пористых средах с помощью метода акустической эмиссии [Текст] / Д.М. Кузнецов, В.Л. Гапонов, С.И. Буйло // Вестник Донского государственного технического университета. – 2014. – Т. 14. – №4 (79). – С. 194–201.

71. Волкова, З.В. Смачиваемость твердых тел как характеристика молекулярной природы их поверхности и новый метод ее измерения [Текст] / З.В. Волкова // Журнал физической химии. – 1939. – Т. 13. (2). – С. 224–238.

72. Бабенко, С.А. Определение смачиваемости мелкозернистых минералов [Текст] / С.А. Бабенко // Известия Томского ордена почета Красного Знамени политехнического института им. С.М. Кирова. – 1965. – Т. 128. – С. 146–147.

73. Волков, В.И. Оценка капиллярного поднятия [Текст] / В.И. Волков, Д.Ю. Козлов // Известия Алтайского государственного университета. – 2007. – № 1(53). – С. 224–238.
74. ГОСТ 25336. Посуда и оборудование лабораторные стеклянные. Типы, основные параметры и размеры (с Изм. № 1-4) – введ. 01.01.1984. – М.: Издательство стандартов, 2008. – 22 с.
75. ISO 6706-81 Посуда лабораторная пластмассовая. Цилиндры градуированные мерные. Изд. 1 Е ТС. 2012 – 12 с.
76. ГОСТ 32513-2013. Топлива моторные. Бензин неэтилированный. Технические условия. – М.: Стандартинформ, 2019. – 134 с.
77. ГОСТ 14198-78. Государственный стандарт. Циклогексан технический. Технические условия (с Изм. №1,2). – М.: ИПК Издательство Стандартов, 1999. – 6 с.
78. ГОСТ 5962-2013. Спирт этиловый ректифицированный из пищевого сырья. Технические условия. – М.: Стандартинформ, 2014. – 5 с.
79. ГОСТ 32511-2013 (EN 590:2009). Топливо дизельное ЕВРО. Технические условия. – М.: Стандартинформ, 2019. – 6 с.
80. ГОСТ 10227-2013. Топлива для реактивных двигателей. Технические условия. – М.: Стандартинформ, 2014. – 14 с.
81. ГОСТ 2768-84. Ацетон технический. Технические условия (с Изм. №1, 2). – М.: ИПК Издательство Стандартов, 2001. – 14 с.
82. ГОСТ 22967-90 (СТ СЭВ 2486-80, СТ СЭВ 3399-81). Шприцы медицинские инъекционные многократного применения. Общие технические требования и методы испытаний (с Изм. №1). – М.: ИПК Издательство Стандартов, 1998. – 10 с.
83. ГОСТ Р 53228-2008. Весы неавтоматического действия. Часть 1. Метрологические и технические требования. Испытания (с Изм. № 1). – М.: Стандартинформ, 2010. – 133 с.
84. Шебеко, А.Ю. Обзор характерных аварий с пожарами и взрывами на объектах с обращением газомоторного топлива [Текст] / А.Ю. Шебеко, Е.Е.

Простов, Д.М. Гордиенко [и др.] Пожарная безопасность. – 2018. – № 2. – С. 84–89.

85. Zanganeh, J. Flame spread over porous sand beds wetted with propanol / J. Zanganeh, B. Moghtaderi // Fire and materials / March – 2011. – №35(2) – PP. 61–70.

86. Kong, W. Burning characteristics of non-spread diffusion flames of liquid fuel soaked in porous beds / Chr.Y.H. Chao, J. H.Wang. Journal of fire sciences / May – 2002. – №20. – PP. 203–225.

87. Самойлов, Н.А. Математическое моделирование испаряемости нефти и нефтепродуктов при их аварийных разливах [Текст] / Н.А. Самойлов, А.А. да Консейсао // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2010. – Т. 12. – №1 (9). – С. 2251– 2254.

88. Консейсао, А.А. да. Исследование капиллярного подъема нефти и нефтепродуктов в сорбенте «DULROMABSORB» [Текст] / А.А. да Консейсао, Н.А. Самойлов // Башкирский химический журнал. – 2007. – Т.14. – №4. – С. 66–69.

89. Ширяев, Е.В. Исследование параметров подложки гранулированного пеностекла, влияющих на снижение интенсивности испарения горючих жидкостей [Электронный ресурс] / Е.В. Ширяев // Современные проблемы гражданской защиты. – 2019. – №4. – С. 19–27. – Режим доступа: <http://ntp.edufire37.ru/wp-content/uploads/2018/12/№3-2018-готово.pdf> (дата обращения 15.07.2021).

90. Hayasaka, H. Unsteady Burning Rates Of Small Pool Fires / H. Hayasaka // Fire Safety Science – Proceedings of the fifth International symposium – 1997. – №5. – PP. 499–510.

91. Ишанходжаева, М.М. Физическая химия. Часть I. Диффузия в системах с твердой фазой [Текст] / М.М. Ишанходжаева. – СПб.: СПбГТУРП. – 2012. – 35 с.

92. Чизмаджев, Ю.А. Макрокинетика процессов в пористых средах [Текст] / Ю.А. Чизмаджев, В.С. Маркин, М.Р. Тарасевич, Ю.Г. Чирков. – М.: Наука. – 1971. – 364 с.
93. Ентов, В.Н. Теория фильтрации [Текст] / В.Н. Ентов // Соровский образовательный журнал. – 1998. – №2. – С. 121–128.
94. Леонтьев, Н.Е. Основы теории фильтрации [Текст] / Н.Е. Леонтьев. – М.: МГУ. – 2009. – 87 с.
95. Шафранец, Б.П. К вопросу о подвижности частиц и молекул в пористых средах [Текст] / Б.П. Шафранец, В.Е. Курочкин // Научное приборостроение. – 2015. – Т. 25. – №4. – С. 43–55.
96. Лыков, А.В. Явления переноса в капиллярно-пористых телах. М.: ИТТЛ. – 1954. – 296 с.
97. Михайлов, Н.Н. Показатели смачиваемости в пористой среде и зависимость между ними. [Текст] / Н.Н. Михайлов, Л.С. Сечина, И.П. Гурбатова // Георесурсы. Геоэнергетика. Геополитика. – 2011. – №1 (3). – С. 1–10.
98. ГОСТ 427-75. Линейки измерительные металлические. Технические условия (с Изм. № 1, 2, 3). – М.: Стандартинформ, 2007. – 5 с.
99. Кикоин, И.К. Таблицы физических величин: справочник [Текст]; под ред. акад. И.К. Кикоина. – М.: Атомиздат. – 1976. – 1008 с.
100. Бабичев, А.П. Физические величины: справочник [Текст] / А.П. Бабичев, Н.А. Бабушкина, А.М. Братковский [и др.]; под ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова. – М.: Энергоатомиздат. – 1991. – 1232 с.
101. Ширяев, Е.В. Анализ пожароопасных ситуаций, связанных с локальными проливами нефтепродуктов на объектах нефтепродуктохранения [Текст] / Е.В. Ширяев // Пожарная безопасность: проблемы и перспективы: сборник статей по материалам VIII Всероссийской науч.-практ. конф. с междунар. участием. – Воронеж: ФГБОУ ВО Воронежский институт ГПС МЧС России. – 2017. – С. 205–209.

102. 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.
103. Berlad, A. L. Effect of Channel Geometry on the Quenching of Laminar Flames / A. L. Berlad, A. E. Potter // U.S. N.A.C.A. RM E54C05. – 1954. – P.32.
104. Berlad, A. L. A Thermal Equation for Flame Quenching / A. L. Berlad, A. E. Potter // U.S. N.A.C.A. T.N. 3398. – 1955. – P.19.
105. Дадашов, И.Ф. Исследование влияния толщины слоя гранулированного пеностекла на горение жидкостей ряда алканов [Текст] / И.Ф. Дадашов // Вестник университета гражданской защиты МЧС Беларуси. – 2018. – Т.2. – №3. – С. 320–324.
106. Дадашов, И.Ф. Экспериментальное исследование влияния скорости ветра на изолирующие свойства гелеобразного слоя по отношению к парам токсичных и горючих жидкостей [Текст] / И.Ф. Дадашов // Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси. – 2018. – Т.2. – №3. – С. 320–324.
107. А.с.1498507 СССР, Кл. А 62 С 3/06. Способ тушения полярных жидкостей [Текст] / И.В. Богданов, Е.Я. Мокроусов, В.В. Агафонов [и др.] – 4290524/40-12; заявл. 19.07.87; опубл. 07.08.89, Бюл. №29. – С. 2.
108. Коленкина, Е.И. Фильтрационные течения в пористых средах: монография [Текст] / Е.И. Коленкина, В.Ф. Никитин, О.А. Логвинов, Н.Н. Смирнов. – М.: Изд-во ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН. – 2020. – 73 с.
109. Бочкарев, А.А. Модель Бринкмана с учетом неравномерной пористости [Текст] / А.А. Бочкарев, В.И. Волков // Известия Алтайского государственного университета. – 2002. – № 1 (23). – С. 106–107.
110. Шафранец, Б.П. К вопросу подвижности частиц и молекул в пористых средах [Текст] / Б.П. Шафранец, В.Е. Курочкин // Научное приборостроение. – 2015. – Т. 25. – № 4. – С. 43–55.

111. Bear, J. Dynamics of fluids in porous media / J. Bear // N-Y, London, Amsterdam: American Elsevier Publ. Comp. – 1972. – 764 p.
112. Nield, D.A. Convection in porous media / D.A. Nield, A. Bejan // N-Y: Springer. – 2013. – 778 p. doi: 10.1007/978-1-4614-5541-7.
113. Bruus, H. Theoretical microfluidics / Bruus, H. // Oxford: University Press. – 2008. – 346 p.
114. Handbook of porous media / Taylor & Francis Group, LLC // Ed. by Kambiz Vafai. 2-d edition. CRC Press, 2005. 744 p. doi: 10.1201/9780415876384.
115. Dullien, F.A.L. Porous Media Fluid Transport and Pore Structure / F.A.L. Dullien // London: Academic Press. – 1979. – 396 p.
116. Schaaf, S.A., Chambre P.L. 1961. Flow of rarefied gases / S.A. Schaaf, P.L. Chambre // Princeton University Press, Princeton, NJ. – 1961. – 63 p.
117. Firoozabadi, A., Katz D.L. An analysis of high-velocity gas flow through porous media / A. Firoozabadi, D.L. Katz // J Petrol Technol. – 1979. №31 (02). – P. 211-216.
118. Ergun, S., Orning A.A. Fluid Flow through Packed Columns, Journal of Chemical Engineering Progress, Vol. 48, №2, 1952, pp. 89-94.
119. Мухин, В.А. Исследование процессов теплообмена при фильтрации в пористых средах [Текст] / В.А. Мухин, Н.Н. Смирнова. – Новосибирск: Препринт. – 1978. – 27 с.
120. Бочкарев, А.А. Модель Бринкмана с учетом неравномерной пористости [Текст] / А.А. Бочкарев, В.И. Волков // Известия Алтайского государственного университета. – 2002. – № 1(23). – С. 106–107.
121. Ширяев, Е.В. Снижение термических и геометрических параметров пламени при горении нефтепродуктов на основе применения гранулированных подложек [Текст] / Е.В. Ширяев, В.П. Назаров [и др.] // Проблемы техносферной безопасности – 2015: материалы IV Международной научн.-практ. конф. молодых ученых и специалистов. – М.: Академия ГПС МЧС России. – 2015. – С. 159–164.

122. 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 научн.-практ. конф. молодых ученых и специалистов. – М.: Академия ГПС МЧС России. – 2016. – С. 94–100.

123. 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 научн.-практ. конф. – Химки: Академия гражданской защиты МЧС России. – 2018. – С. 80–85.

124. Ширяев, Е.В. Огнезащитный эффект гранулированной пеностекляной подложки при углеводородном пожаре пролива [Текст] / Е.В. Ширяев, Д.Н. Рубцов, В.П. Назаров [и др.] // Безопасность жизнедеятельности. – 2016. – №4. – С. 33–37.

125. 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. – Режим доступа: <http://agps-2006.narod.ru/ttb/2017-3/02-03-17.ttb.pdf>. (Дата обращения 09.09.2021 г.).

126. 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.

127. Ширяев, Е.В. Горение n-гексана на пределе гашения пламени в емкости с пористой средой [Текст] / Е.В. Ширяев // Современные пожаробезопасные материалы и технологии: сборник материалов IV Международной научн.-практ. конф., Иваново, 15 октября 2020 г. – Иваново: ИПСА ГПС МЧС России. – 2020. – С. 125–128.

128. 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 научн.-практ. конф., Санкт-Петербург, 14 апреля 2020 г. Т.1. – СПб.: Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, 2020. – С. 115–118.

129. 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 научн.-практ. конф. молодых ученых и специалистов, Академия ГПС МЧС России, Москва. – 7-8 апреля 2020. – Режим доступа: <https://www.scispace.com/publication/1217/text>. (Дата обращения 09.09.2021 г.).

130. 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 научн.-практ. конф., Иваново, 20 апреля 2021 г. – Иваново: ИПСА ГПС МЧС России, 2021. – С. 413–415.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Результаты оценки массы паров углеводородных жидкостей при экранировании поверхности испарения слоем гранул пеностекла разных фракций

Таблица А.1 – Масса паров бензина АИ-92 при испарении через СГП фракции 1-4 мм

Время, сек	Высота сухого слоя Нс, см						
	0	1,5	3	4,5	6	7,5	9
	Масса паров, тп, г						
60	0,8788	0,4000	0,2409	0,1394	0,1197	0,0773	0,0485
120	0,8106	0,4045	0,2061	0,1174	0,1106	0,0583	0,0455
180	0,7677	0,3914	0,2121	0,1187	0,1076	0,0571	0,0414
240	0,7273	0,3996	0,2212	0,1193	0,1061	0,0564	0,0417
300	0,6970	0,4118	0,2233	0,1197	0,1027	0,0561	0,0415
360	0,6414	0,4293	0,2260	0,1199	0,1005	0,0558	0,0419
420	0,6082	0,4182	0,2268	0,1201	0,0989	0,0556	0,0422
480	0,5852	0,4157	0,2292	0,1203	0,0977	0,0555	0,0424
540	0,5640	0,4141	0,2301	0,1204	0,0968	0,0544	0,0426
600	0,5485	0,4132	0,2280	0,1205	0,0961	0,0535	0,0427
660	0,5372	0,4174	0,2299	0,1205	0,0955	0,0528	0,0428
720	0,5227	0,4102	0,2254	0,1206	0,0949	0,0528	0,0429
780	0,5093	0,4083	0,2231	0,1171	0,0945	0,0528	0,0430
840	0,4989	0,4064	0,2202	0,1207	0,0942	0,0532	0,0431
900	0,4889	0,4105	0,2182	0,1207	0,0938	0,0538	0,0431
Среднее	0,8788	0,4100	0,2240	0,1210	0,1006	0,0564	0,0430

Таблица А.2 – Масса паров бензина АИ-92 при испарении через СГП фракции 5-7 мм

Время	Высота сухого слоя Нс, см					
	1,5	3	4,5	6	7,5	9
	Масса паров, тп, г					
60	0,4182	0,2409	0,1227	0,0939	0,0545	0,0258
120	0,3689	0,1636	0,0955	0,0720	0,0394	0,0242
180	0,3525	0,1586	0,0864	0,0700	0,0369	0,0207
240	0,3443	0,1572	0,0886	0,0690	0,0348	0,0193
300	0,3394	0,1561	0,0878	0,0684	0,0379	0,0173
360	0,3293	0,1558	0,0873	0,0680	0,0361	0,0179
420	0,3203	0,1554	0,0869	0,0677	0,0348	0,0184
480	0,3148	0,1551	0,0866	0,0675	0,0339	0,0187
540	0,3081	0,1549	0,0864	0,0673	0,0340	0,0190
600	0,3021	0,1547	0,0862	0,0671	0,0336	0,0192
660	0,2968	0,1545	0,0860	0,0670	0,0355	0,0194
720	0,2928	0,1543	0,0859	0,0669	0,0354	0,0191
780	0,2866	0,1542	0,0858	0,0669	0,0352	0,0195
840	0,2830	0,1539	0,0857	0,0668	0,0350	0,0195
900	0,2788	0,1548	0,0856	0,0667	0,0349	0,0195
Среднее	0,3224	0,1616	0,0896	0,0697	0,0368	0,0198

Таблица А.3 – Масса паров бензина АИ-92 при испарении через СГП фракции 10-15 мм

Время, сек	Высота сухого слоя Нс, см					
	1,5	3	4,5	6	7,5	9
	Масса паров, мг, г					
60	0,3773	0,2197	0,1348	0,1197	0,0712	0,0697
120	0,3485	0,1742	0,1152	0,1015	0,0636	0,0561
180	0,3389	0,1722	0,1086	0,0955	0,0581	0,0515
240	0,3341	0,1697	0,1053	0,0924	0,0553	0,0492
300	0,3312	0,1682	0,1033	0,0906	0,0536	0,0479
360	0,3293	0,1672	0,1020	0,0894	0,0525	0,0470
420	0,3258	0,1665	0,1011	0,0885	0,0517	0,0457
480	0,3231	0,1640	0,1004	0,0879	0,0511	0,0447
540	0,3210	0,1621	0,0998	0,0874	0,0507	0,0439
600	0,3194	0,1606	0,0994	0,0870	0,0503	0,0433
660	0,3167	0,1594	0,0990	0,0866	0,0500	0,0428
720	0,3144	0,1583	0,0987	0,0864	0,0497	0,0424
780	0,3125	0,1570	0,0985	0,0861	0,0495	0,0421
840	0,3108	0,1567	0,0983	0,0859	0,0494	0,0418
900	0,3094	0,1561	0,0981	0,0858	0,0492	0,0415
Среднее	0,3275	0,1675	0,1042	0,0914	0,0537	0,0473

Таблица А.4 – Масса паров бензина АИ-92 при испарении через СГП фракции 20-30 мм

Время, сек	Высота сухого слоя Нс, см					
	1,5	3	4,5	6	7,5	9
	Масса паров, мг, г					
60	0,3879	0,2652	0,1667	0,1364	0,1015	0,1000
120	0,3402	0,2197	0,1576	0,1258	0,0894	0,0826
180	0,3242	0,2045	0,1439	0,1172	0,0854	0,0753
240	0,3163	0,1970	0,1371	0,1129	0,0833	0,0716
300	0,3115	0,1924	0,1330	0,1103	0,0803	0,0694
360	0,3083	0,1894	0,1303	0,1086	0,0783	0,0679
420	0,3039	0,1872	0,1273	0,1074	0,0768	0,0669
480	0,2987	0,1856	0,1250	0,1064	0,0758	0,0661
540	0,2946	0,1843	0,1232	0,1057	0,0749	0,0655
600	0,2914	0,1833	0,1218	0,1052	0,0742	0,0650
660	0,2887	0,1825	0,1207	0,1047	0,0737	0,0646
720	0,2865	0,1818	0,1197	0,1043	0,0732	0,0643
780	0,2846	0,1812	0,1189	0,1034	0,0728	0,0640
840	0,2830	0,1807	0,1182	0,1026	0,0725	0,0637
900	0,2816	0,1803	0,1176	0,1019	0,0722	0,0635
Среднее	0,3068	0,1944	0,1307	0,1102	0,0790	0,0700

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Результаты оценки интенсивности испарения углеводородных жидкостей при экранировании поверхности испарения слоем гранулированного пеностекла фракции 5-7 мм

Таблица Б.1 – Интенсивность испарения ЛВЖ без СГП

Время, сек	Интенсивность испарения ЛВЖ, г/с·м ²					
	ацетон	н-гексан	бензин АИ-92	этанол	керосин (авиаци.)	диз. топливо
60	0,5152	0,4500	0,8788	0,0652	0,0455	0,0091
120	0,4621	0,4417	0,8106	0,0629	0,0432	0,0076
180	0,4394	0,4227	0,7677	0,0606	0,0429	0,0066
240	0,4318	0,4019	0,7272	0,0591	0,0394	0,0057
300	0,4303	0,3894	0,6970	0,0567	0,0373	0,0055
360	0,4217	0,3811	0,6414	0,0551	0,0371	0,0051
420	0,4221	0,3751	0,6082	0,0539	0,0353	0,0048
480	0,4110	0,3669	0,5852	0,0530	0,0343	0,0045
540	0,4108	0,3604	0,5640	0,0524	0,0332	0,0044
600	0,4015	0,3553	0,5485	0,0518	0,0323	0,0042
660	0,3926	0,3511	0,5372	0,0514	0,0315	0,0041
720	0,3914	0,3463	0,5227	0,0510	0,0308	0,0040
780	0,3869	0,3423	0,5093	0,0507	0,0302	0,0040
840	0,3799	0,3389	0,4989	0,0504	0,0295	0,0039
900	0,3747	0,3359	0,4889	0,0502	0,0291	0,0038
Среднее	0,4181	0,3773	0,6257	0,0550	0,0354	0,0051

Таблица Б.2 – Интенсивность испарения ЛВЖ с СГП $H_c = 1,5$ см

Время, сек	Интенсивность испарения ЛВЖ, г/с·м ²					
	ацетон	н-гексан	бензин АИ-92	этанол	керосин (авиаци.)	диз. топливо
60	0,2955	0,2364	0,4182	0,0394	0,0182	0,0030
120	0,2538	0,2152	0,3818	0,0356	0,0167	0,0023
180	0,2374	0,2131	0,3626	0,0323	0,0162	0,0020
240	0,2273	0,2053	0,3485	0,0303	0,0163	0,0019
300	0,2236	0,1988	0,3388	0,0291	0,0158	0,0021
360	0,2164	0,1937	0,3293	0,0283	0,0149	0,0020
420	0,2128	0,1907	0,3203	0,0277	0,0152	0,0019
480	0,2108	0,1873	0,3148	0,0273	0,0148	0,0019
540	0,2076	0,1855	0,3081	0,0269	0,0146	0,0019
600	0,2050	0,1830	0,3021	0,0267	0,0144	0,0020
660	0,2032	0,1813	0,2968	0,0264	0,0140	0,0019
720	0,2023	0,1804	0,2928	0,0263	0,0138	0,0019
780	0,2001	0,1788	0,2866	0,0261	0,0136	0,0019
840	0,1992	0,1776	0,2830	0,0260	0,0135	0,0018
900	0,1982	0,1766	0,2788	0,0259	0,0134	0,0019
Среднее	0,2195	0,1936	0,3242	0,0289	0,0150	0,0020

Таблица Б.3 – Интенсивность испарения ЛВЖ с СГП $H_c = 3,0$ см

Время, сек	Интенсивность испарения ЛВЖ, г/с·м ²					
	ацетон	н-гексан	бензин АИ-92	этанол	керосин (авиац.)	диз. топливо
60	0,0864	0,0788	0,2409	0,0227	0,0144	0,0015
120	0,0917	0,0833	0,1636	0,0205	0,0102	0,0012
180	0,0985	0,0838	0,1586	0,0197	0,0093	0,0011
240	0,1004	0,0856	0,1572	0,0189	0,0093	0,0011
300	0,1009	0,0864	0,1561	0,0185	0,0089	0,0010
360	0,1033	0,0876	0,1558	0,0182	0,0090	0,0010
420	0,1032	0,0894	0,1554	0,0180	0,0090	0,0010
480	0,1047	0,0902	0,1551	0,0178	0,0090	0,0010
540	0,1056	0,0914	0,1549	0,0177	0,0093	0,0010
600	0,1058	0,0924	0,1547	0,0176	0,0092	0,0010
660	0,1065	0,0934	0,1545	0,0175	0,0090	0,0010
720	0,1059	0,0944	0,1543	0,0174	0,0090	0,0010
780	0,1071	0,0955	0,1542	0,0174	0,0089	0,0010
840	0,1078	0,0962	0,1539	0,0173	0,0089	0,0010
900	0,1079	0,0972	0,1548	0,0173	0,0088	0,0009
Среднее	0,1024	0,0897	0,1616	0,0184	0,0095	0,0010

Таблица Б.4 – Интенсивность испарения ЛВЖ с СГП $H_c = 4,5$ см

Время, сек	Интенсивность испарения ЛВЖ, г/с·м ²					
	ацетон	н-гексан	бензин АИ-92	этанол	керосин (авиац.)	диз. топливо
60	0,0530	0,0303	0,0606	0,0167	0,0106	0,0009
120	0,0485	0,0402	0,0652	0,0159	0,0091	0,0008
180	0,0510	0,0429	0,0677	0,0157	0,0081	0,0008
240	0,0523	0,0447	0,0689	0,0155	0,0080	0,0008
300	0,0530	0,0461	0,0694	0,0152	0,0078	0,0008
360	0,0540	0,0467	0,0697	0,0149	0,0077	0,0008
420	0,0550	0,0474	0,0699	0,0147	0,0076	0,0008
480	0,0559	0,0481	0,0703	0,0146	0,0075	0,0008
540	0,0562	0,0488	0,0704	0,0145	0,0075	0,0008
600	0,0571	0,0498	0,0705	0,0144	0,0075	0,0008
660	0,0572	0,0499	0,0707	0,0143	0,0074	0,0008
720	0,0578	0,0503	0,0706	0,0143	0,0074	0,0008
780	0,0583	0,0508	0,0705	0,0142	0,0074	0,0008
840	0,0583	0,0512	0,0706	0,0142	0,0074	0,0008
900	0,0586	0,0516	0,0707	0,0141	0,0073	0,0008
Среднее	0,0551	0,0466	0,0690	0,0149	0,0079	0,0008

Таблица Б.5 – Интенсивность испарения ЛВЖ с СГП $H_c = 6,0$ см

Время, сек	Интенсивность испарения ЛВЖ, г/с·м ²					
	ацетон	н-гексан	бензин АИ-92	этанол	керосин (авиац.)	диз. топливо
60	0,0409	0,0379	0,0364	0,0121	0,0076	0,0008
120	0,0432	0,0379	0,0394	0,0114	0,0076	0,0007
180	0,0449	0,0379	0,0429	0,0111	0,0071	0,0007
240	0,0462	0,0379	0,0451	0,0110	0,0072	0,0006
300	0,0476	0,0379	0,0476	0,0109	0,0073	0,0006
360	0,0482	0,0384	0,0503	0,0109	0,0073	0,0006
420	0,0485	0,0387	0,0498	0,0108	0,0074	0,0006
480	0,0491	0,0390	0,0508	0,0108	0,0074	0,0006
540	0,0488	0,0392	0,0512	0,0108	0,0074	0,0006
600	0,0494	0,0394	0,0517	0,0108	0,0074	0,0006
660	0,0496	0,0395	0,0521	0,0107	0,0074	0,0006
720	0,0500	0,0396	0,0524	0,0107	0,0074	0,0006
780	0,0500	0,0397	0,0527	0,0107	0,0075	0,0006
840	0,0503	0,0398	0,0529	0,0107	0,0075	0,0006
900	0,0506	0,0399	0,0530	0,0107	0,0075	0,0006
Среднее	0,0478	0,0389	0,0485	0,0109	0,0074	0,0006

Таблица Б.6 – Интенсивность испарения ЛВЖ с СГП $H_c = 7,5$ см

Время, сек	Интенсивность испарения ЛВЖ, г/с·м ²					
	ацетон	н-гексан	бензин АИ-92	этанол	керосин (авиац.)	диз. топливо
60	0,0288	0,0197	0,0273	0,0061	0,0035	0,0005
120	0,0288	0,0174	0,0280	0,0068	0,0033	0,0004
180	0,0288	0,0182	0,0293	0,0076	0,0032	0,0004
240	0,0288	0,0189	0,0314	0,0083	0,0031	0,0003
300	0,0288	0,0191	0,0324	0,0082	0,0030	0,0003
360	0,0288	0,0202	0,0338	0,0083	0,0031	0,0003
420	0,0288	0,0216	0,0348	0,0084	0,0032	0,0003
480	0,0288	0,0225	0,0358	0,0085	0,0034	0,0003
540	0,0290	0,0236	0,0367	0,0086	0,0035	0,0003
600	0,0291	0,0244	0,0371	0,0086	0,0036	0,0003
660	0,0292	0,0211	0,0376	0,0087	0,0037	0,0003
720	0,0293	0,0229	0,0381	0,0087	0,0037	0,0003
780	0,0294	0,0233	0,0382	0,0087	0,0038	0,0003
840	0,0294	0,0236	0,0389	0,0088	0,0038	0,0003
900	0,0295	0,0232	0,0387	0,0088	0,0039	0,0003
Среднее	0,0290	0,0213	0,0346	0,0082	0,0035	0,0003

Таблица Б.7 – Интенсивность испарения ЛВЖ с СГП $H_c = 9,0$ см

Время, сек	Интенсивность испарения ЛВЖ, г/с·м ²					
	ацетон	н-гексан	бензин АИ-92	этанол	керосин (авиац.)	диз. топливо
60	0,0152	0,0136	0,0227	0,0045	0,0021	0,0003
120	0,0152	0,0136	0,0227	0,0045	0,0021	0,0002
180	0,0152	0,0136	0,0227	0,0051	0,0021	0,0002
240	0,0152	0,0133	0,0227	0,0053	0,0022	0,0002
300	0,0152	0,0145	0,0227	0,0055	0,0023	0,0002
360	0,0152	0,0146	0,0227	0,0056	0,0023	0,0002
420	0,0152	0,0147	0,0227	0,0056	0,0024	0,0002
480	0,0152	0,0148	0,0227	0,0057	0,0024	0,0002
540	0,0152	0,0148	0,0227	0,0057	0,0024	0,0002
600	0,0150	0,0148	0,0227	0,0058	0,0024	0,0002
660	0,0149	0,0149	0,0227	0,0058	0,0024	0,0002
720	0,0148	0,0149	0,0227	0,0058	0,0024	0,0002
780	0,0147	0,0149	0,0227	0,0058	0,0025	0,0002
840	0,0146	0,0149	0,0227	0,0058	0,0025	0,0002
900	0,0145	0,0149	0,0227	0,0059	0,0025	0,0002
Среднее	0,0150	0,0145	0,0227	0,0055	0,0023	0,0002

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Результаты оценки высоты зоны, ограниченной нижним концентрационным пределом распространения пламени паров при экранировании поверхности углеводородной жидкости слоем гранулированного пеностекла

Таблица В.1 – Высота зоны, ограниченной НКПР паров при экранировании поверхности углеводородной жидкости СГП

Время, с	ацетон			бензин		
	Нс = 6,0 см	Нс = 7,5 см	Нс = 9,0 см	Нс = 6,0 см	Нс = 7,5 см	Нс = 9,0 см
	$Z_{нкпр}, м$			$Z_{нкпр}, м$		
60	0,042	0,037	0,038	0,047	0,043	0,035
120	0,053	0,049	0,043	0,060	0,054	0,045
180	0,062	0,056	0,051	0,071	0,063	0,050
240	0,068	0,062	0,054	0,079	0,070	0,056
300	0,074	0,067	0,059	0,087	0,077	0,061
420	0,084	0,076	0,068	0,099	0,088	0,069
480	0,088	0,079	0,070	0,104	0,092	0,072
540	0,091	0,083	0,073	0,108	0,097	0,075
600	0,095	0,086	0,076	0,112	0,101	0,078
720	0,101	0,091	0,083	0,120	0,108	0,083
780	0,103	0,094	0,085	0,123	0,111	0,086
900	0,109	0,099	0,091	0,129	0,117	0,090
Время, с	гексан			этанол		
60	0,041	0,038	0,034	0,036	0,033	0,029
120	0,050	0,046	0,043	0,044	0,040	0,036
180	0,058	0,054	0,049	0,050	0,046	0,041
240	0,065	0,060	0,053	0,054	0,050	0,045
300	0,072	0,065	0,059	0,057	0,054	0,048
420	0,080	0,075	0,066	0,064	0,060	0,054
480	0,085	0,080	0,069	0,066	0,062	0,056
540	0,089	0,084	0,072	0,069	0,064	0,058
600	0,092	0,088	0,075	0,071	0,066	0,060
720	0,099	0,091	0,079	0,075	0,070	0,064
780	0,102	0,095	0,082	0,077	0,072	0,066
900	0,107	0,099	0,086	0,081	0,076	0,069
Время, с	керосин			диз. топливо		
60	0,027	0,025	0,022	0,028	0,017	0,015
120	0,030	0,028	0,025	0,033	0,020	0,018
180	0,034	0,032	0,028	0,036	0,023	0,020
240	0,037	0,035	0,030	0,039	0,025	0,022
300	0,039	0,038	0,033	0,040	0,026	0,024
420	0,044	0,042	0,037	0,043	0,029	0,027
480	0,046	0,044	0,039	0,044	0,030	0,028
540	0,049	0,045	0,041	0,045	0,031	0,029
600	0,050	0,047	0,042	0,045	0,032	0,030
720	0,053	0,049	0,045	0,046	0,034	0,032
780	0,054	0,051	0,046	0,046	0,035	0,033
900	0,056	0,053	0,049	0,048	0,037	0,034

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

Результаты оценки времени сгорания паров легковоспламеняющихся жидкостей при экранировании поверхности испарения слоем гранулированного пеностекла

Таблица Г.1 – Время сгорания паров ЛВЖ при экранировании поверхности испарения СГП, τ , с

Время, с	ацетон			бензин		
	$H_c = 6,0$ см	$H_c = 7,5$ см	$H_c = 9,0$ см	$H_c = 6,0$ см	$H_c = 7,5$ см	$H_c = 9$ см
60	0,094	0,084	0,086	0,104	0,094	0,078
120	0,121	0,112	0,098	0,134	0,120	0,099
180	0,140	0,126	0,116	0,158	0,139	0,112
240	0,155	0,142	0,123	0,176	0,156	0,125
300	0,169	0,152	0,135	0,193	0,170	0,136
360	0,180	0,163	0,145	0,209	0,183	0,145
420	0,190	0,172	0,154	0,219	0,195	0,153
480	0,199	0,180	0,159	0,230	0,205	0,161
540	0,207	0,188	0,166	0,240	0,215	0,168
600	0,215	0,195	0,173	0,249	0,224	0,174
660	0,222	0,202	0,183	0,258	0,232	0,180
720	0,229	0,208	0,189	0,266	0,240	0,185
780	0,235	0,214	0,194	0,274	0,246	0,190
840	0,242	0,219	0,202	0,281	0,254	0,195
900	0,248	0,225	0,207	0,288	0,259	0,200
Время, с	гексан			этанол		
	$H_c = 6,0$ см	$H_c = 7,5$ см	$H_c = 9,0$ см	$H_c = 3,0$ см	$H_c = 4,5$ см	$H_c = 6,0$ см
60	0,105	0,098	0,087	0,065	0,059	0,053
120	0,128	0,119	0,109	0,079	0,073	0,065
180	0,149	0,138	0,125	0,089	0,083	0,074
240	0,166	0,153	0,136	0,097	0,091	0,081
300	0,183	0,166	0,151	0,103	0,097	0,087
360	0,194	0,179	0,161	0,109	0,102	0,092
420	0,206	0,193	0,170	0,114	0,107	0,097
480	0,217	0,204	0,178	0,119	0,112	0,101
540	0,227	0,215	0,185	0,124	0,116	0,105
600	0,237	0,226	0,192	0,128	0,120	0,109
660	0,245	0,222	0,198	0,132	0,123	0,112
720	0,253	0,235	0,204	0,135	0,127	0,115
780	0,261	0,242	0,209	0,139	0,130	0,118
840	0,269	0,249	0,214	0,142	0,133	0,121
900	0,275	0,254	0,219	0,145	0,136	0,124

Окончание таблицы Г.1

Время, с	керосин			ДИЗ. ТОПЛИВО		
	$H_c = 1,5$ см	$H_c = 3,0$ см	$H_c = 4,5$ см	$H_c = 1,5$ см	$H_c = 3,0$ см	$H_c = 4,5$ см
60	0,068	0,061	0,055	0,064	0,041	0,034
120	0,076	0,071	0,064	0,077	0,047	0,042
180	0,084	0,081	0,069	0,084	0,053	0,047
240	0,093	0,088	0,075	0,090	0,057	0,052
300	0,099	0,094	0,082	0,092	0,061	0,056
360	0,105	0,100	0,088	0,095	0,064	0,059
420	0,110	0,104	0,093	0,099	0,067	0,062
480	0,115	0,109	0,098	0,101	0,070	0,065
540	0,121	0,113	0,102	0,103	0,073	0,067
600	0,125	0,117	0,106	0,105	0,075	0,070
660	0,128	0,120	0,110	0,105	0,077	0,072
720	0,132	0,124	0,112	0,107	0,079	0,074
780	0,135	0,127	0,116	0,107	0,081	0,076
840	0,138	0,130	0,120	0,107	0,083	0,078
900	0,141	0,133	0,122	0,111	0,085	0,079

ПРИЛОЖЕНИЕ Д

Оценка погрешности результатов измерений критической высоты «сухого» слоя гранулированного пеностекла

Таблица Д.1 – Экспериментальные значения критической высоты «сухого» СГП $H_{кр}$, м

№п/п	Площадь поддона, F_n , м ²				Площадь поддона, F_n , м ²			
	0,018	0,35	1,00	1,50	0,018	0,35	1,00	1,50
	Бензин АИ-92				Ацетон			
1	0,084	0,116	0,125	0,125	0,080	0,114	0,122	0,128
2	0,085	0,114	0,120	0,128	0,078	0,116	0,123	0,132
3	0,087	0,115	0,120	0,136	0,080	0,112	0,126	0,127
4	0,083	0,116	0,123	0,136	0,074	0,110	0,124	0,122
5	0,087	0,110	0,128	0,138	0,077	0,106	0,114	0,134
№п/п	Гексан				Этанол			
1	0,070	0,100	0,102	0,108	0,040	0,052	0,057	0,059
2	0,073	0,105	0,112	0,120	0,043	0,054	0,052	0,055
3	0,072	0,106	0,110	0,110	0,045	0,049	0,050	0,054
4	0,072	0,101	0,105	0,111	0,045	0,055	0,053	0,051
5	0,076	0,098	0,110	0,108	0,043	0,048	0,050	0,052
№п/п	Керосин авиац.				ДИЗ. ТОПЛИВО			
1	0,040	0,052	0,057	0,059	0,031	0,040	0,040	0,041
2	0,043	0,054	0,052	0,055	0,029	0,039	0,041	0,048
3	0,045	0,049	0,050	0,054	0,032	0,038	0,043	0,043
4	0,045	0,055	0,053	0,051	0,031	0,041	0,040	0,045
5	0,043	0,048	0,050	0,052	0,033	0,039	0,045	0,046

1. Среднее арифметическое серии из n прямых измерений определялось по формуле

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (\text{Д.1})$$

2. Погрешность отдельного измерения определялось по формуле

$$\Delta x = \bar{x} - x_i \quad (\text{Д.2})$$

3. Квадраты погрешностей отдельных измерений определялись как

$$(\Delta x_1)^2, (\Delta x_2)^2, \dots, (\Delta x_n)^2 \quad (\text{Д.3})$$

4. Среднеквадратичная ошибка среднего арифметического определялась

$$\bar{x} = \frac{\sum (\Delta x)^2}{n(n-1)} \quad (\text{Д.4})$$

5. Коэффициент Стьюдента t определялся исходя из $P=0,95$ и числа проведенных измерений $n=5$, t -критерий = 2,7764.

6. Доверительный интервал (погрешность измерения) определялся по формуле

$$\Delta x = S_{\bar{x}} \cdot t \quad (\text{Д.5})$$

7. При величине погрешности результата измерения Δx сравнимой с величиной погрешности прибора $\delta = 0.0005$, то в качестве границы доверительного интервала принималась

$$\Delta x = \sqrt{(S_{\bar{x}} \cdot t)^2 + \delta^2} \quad (\text{Д.6})$$

Если одна из ошибок меньше другой в три или более раз, то меньшая исключалась.

8. Окончательный результат записан в виде

$$x = \bar{x} \pm \Delta x \quad (\text{Д.7})$$

9. Относительная погрешность результата измерений оценивалась по формуле

$$\varepsilon = \frac{\Delta x}{x} \cdot 100\% \quad (\text{Д.8})$$

Результаты вычислений погрешности результатов измерений приведены в таблице Д.2.

Таблица Д.2 – Результаты вычислений погрешности результатов измерений

Параметр	$F_n, \text{м}^2$			
	0,018	0,35	1,00	1,50
вещество	Бензин АИ-92			
\bar{x}	0,0852	0,1142	0,1232	0,1326
Δx	0,0024	0,0034	0,0047	0,0079
S_x	0,00089	0,00124	0,00171	0,00286
$x = \bar{x} \pm \Delta x$	0,0852±0,0024	0,1142±0,0034	0,1232±0,0047	0,1326±0,0079
$\varepsilon, \%$	2,9	3,0	3,9	5,9
вещество	Ацетон			
\bar{x}	0,0778	0,1116	0,1218	0,1286
Δx	0,0034	0,0053	0,0064	0,0065
S_x	0,00124	0,00192	0,00230	0,00233
$x = \bar{x} \pm \Delta x$	0,0778±0,0034	0,1116±0,0053	0,1218±0,0064	0,1286±0,0065
$\varepsilon, \%$	4,4	4,8	5,2	5,0
вещество	Гексан			
\bar{x}	0,0726	0,102	0,1078	0,1114
Δx	0,0030	0,0047	0,0057	0,0069
S_x	0,00109	0,00169	0,00207	0,00249
$x = \bar{x} \pm \Delta x$	0,0726±0,0030	0,102±0,0047	0,1078±0,0057	0,1114±0,0069
$\varepsilon, \%$	4,2	4,6	5,3	6,2
вещество	Этанол			
\bar{x}	0,0432	0,0516	0,0524	0,0542
Δx	0,0028	0,0042	0,0040	0,0043
S_x	0,00102	0,00152	0,0014	0,00156
$x = \bar{x} \pm \Delta x$	0,0432±0,0028	0,0516±0,0042	0,0524±0,0040	0,0542±0,0043
$\varepsilon, \%$	4,2	4,6	5,3	6,2
вещество	Керосин авиац.			
\bar{x}	0,0312	0,0394	0,0418	0,0446
Δx	0,0021	0,0016	0,0030	0,0037
S_x	0,00074	0,00057	0,00108	0,00135
$x = \bar{x} \pm \Delta x$	0,0312±0,0021	0,0394±0,0016	0,0418±0,0030	0,0446±0,0037
$\varepsilon, \%$	6,6	4,0	7,2	8,4
вещество	Диз. топливо			
\bar{x}	0,0200	0,0300	0,0320	0,0332
Δx	0,0017	0,0026	0,0028	0,0032
S_x	0,00061	0,00093	0,00100	0,00114
$x = \bar{x} \pm \Delta x$	0,0200±0,0017	0,0300±0,0026	0,0320±0,0028	0,0332±0,0032
$\varepsilon, \%$	8,5	8,7	8,7	9,5

ПРИЛОЖЕНИЕ Е

Результаты расчета времени «перепада давления», общей и критической высоты «сухого» слоя гранулированного пеностекла. Результаты эксперимента и их обработка.

Таблица Е.1 – Результаты расчета времени «перепада давления» и критической высоты «сухого» СГП для разной площади поддона

Площадь поддона F, м ²	Время «перепада давления», $\tau_{\Delta p}$, с	Критическая высота «сухого» СГП $H_{кр}$, м					
		Ацетон	Бензин	Гексан	Этанол	Керосин	ДТ
0,018	0,230	0,077	0,080	0,068	0,035	0,027	0,019
0,1	0,387	0,100	0,104	0,088	0,046	0,035	0,025
0,2	0,450	0,108	0,112	0,095	0,049	0,038	0,027
0,3	0,487	0,113	0,117	0,099	0,051	0,039	0,028
0,35	0,501	0,114	0,118	0,100	0,052	0,040	0,029
0,4	0,513	0,116	0,120	0,101	0,053	0,040	0,029
0,5	0,533	0,118	0,122	0,103	0,054	0,041	0,029
0,6	0,550	0,120	0,124	0,105	0,055	0,042	0,030
0,7	0,564	0,121	0,126	0,106	0,055	0,042	0,030
0,8	0,576	0,123	0,127	0,107	0,056	0,043	0,031
0,9	0,587	0,124	0,128	0,108	0,056	0,043	0,031
1,0	0,596	0,125	0,129	0,109	0,057	0,043	0,031
1,1	0,605	0,126	0,130	0,110	0,057	0,044	0,031
1,2	0,613	0,126	0,131	0,111	0,058	0,044	0,032
1,3	0,620	0,127	0,132	0,111	0,058	0,044	0,032
1,4	0,627	0,128	0,132	0,112	0,058	0,045	0,032
1,5	0,633	0,128	0,133	0,112	0,059	0,045	0,032
1,6	0,639	0,129	0,134	0,113	0,059	0,045	0,032
1,7	0,644	0,130	0,134	0,113	0,059	0,045	0,032
1,8	0,649	0,130	0,135	0,114	0,059	0,045	0,032
1,9	0,654	0,131	0,135	0,114	0,060	0,046	0,033
2,0	0,659	0,131	0,136	0,115	0,060	0,046	0,033
2,1	0,663	0,131	0,136	0,115	0,060	0,046	0,033
2,2	0,668	0,132	0,137	0,116	0,060	0,046	0,033
2,3	0,672	0,132	0,137	0,116	0,060	0,046	0,033
2,4	0,676	0,133	0,138	0,116	0,061	0,046	0,033
2,5	0,679	0,133	0,138	0,117	0,061	0,046	0,033

Таблица Е.2 – Результаты общей высоты СГП в равновесном состоянии, при которой достигается эффект гашения пламени для разной площади поддона

F, м ²	Ацетон	Бензин	Гексан	Этанол	Керосин	ДТ
0,018	0,129	0,140	0,130	0,062	0,050	0,037
0,1	0,166	0,180	0,166	0,079	0,063	0,046
0,2	0,178	0,194	0,178	0,085	0,067	0,049
0,3	0,185	0,201	0,185	0,088	0,069	0,050
0,35	0,188	0,204	0,188	0,089	0,070	0,051
0,4	0,190	0,206	0,190	0,090	0,071	0,052
0,5	0,194	0,210	0,194	0,092	0,072	0,052
0,6	0,197	0,213	0,197	0,093	0,073	0,053
0,7	0,199	0,216	0,199	0,094	0,074	0,054
0,8	0,201	0,218	0,201	0,095	0,075	0,054
0,9	0,203	0,220	0,203	0,096	0,075	0,055
1,0	0,204	0,222	0,204	0,097	0,076	0,055
1,1	0,206	0,223	0,206	0,097	0,077	0,055
1,2	0,207	0,225	0,207	0,098	0,077	0,056
1,3	0,208	0,226	0,208	0,099	0,077	0,056
1,4	0,209	0,227	0,209	0,099	0,078	0,056
1,5	0,210	0,228	0,210	0,100	0,078	0,056
1,6	0,211	0,230	0,211	0,100	0,078	0,057
1,7	0,212	0,230	0,212	0,100	0,079	0,057
1,8	0,213	0,231	0,213	0,101	0,079	0,057
1,9	0,214	0,232	0,214	0,101	0,079	0,057
2	0,215	0,233	0,214	0,102	0,080	0,057
2,1	0,215	0,234	0,215	0,102	0,080	0,058
2,2	0,216	0,234	0,216	0,102	0,080	0,058
2,3	0,217	0,235	0,216	0,102	0,080	0,058
2,4	0,217	0,236	0,217	0,103	0,081	0,058
2,5	0,218	0,236	0,218	0,103	0,081	0,058

Таблица Е.3 – Результаты эксперимента и их обработка

Вид ЛВЖ	x	y	x ²	x·y	ax + b	y-(ax+b)	(y-(ax+b)) ²
	<i>Fn = 0,35 м²</i>						
Бензин	0,11835	0,11400	0,01401	0,01349	0,11593	-0,00193	0,00000
Ацетон	0,11415	0,11000	0,01303	0,01256	0,11188	-0,00188	0,00000
Гексан	0,09995	0,10200	0,00999	0,01020	0,09817	0,00383	0,00001
Этанол	0,05216	0,05200	0,00272	0,00271	0,05201	-0,00001	0,00000
Керосин	0,03977	0,03920	0,00158	0,00156	0,04004	-0,00084	0,00000
ДТ	0,02849	0,03000	0,00081	0,00085	0,02914	0,00086	0,00000
$\sum_{j=1}^n a_j$					S ₁	S ₂	
	0,4529	0,4472	0,0421	0,0414	0,01178	0,00132	
	<i>Fn = 1,00 м²</i>						
Бензин	0,12964	0,12300	0,01681	0,01595	0,13294	-0,00994	0,00010
Ацетон	0,12504	0,12200	0,01564	0,01526	0,12836	-0,00636	0,00004
Гексан	0,10950	0,10800	0,01199	0,01183	0,11288	-0,00488	0,00002
Этанол	0,05714	0,05200	0,00326	0,00297	0,06073	-0,00873	0,00008
Керосин	0,04357	0,04100	0,00190	0,00179	0,04722	-0,00622	0,00004
ДТ	0,03121	0,03100	0,00097	0,00097	0,03490	-0,00390	0,00002
$\sum_{j=1}^n a_j$					S ₁	S ₂	
	0,4961	0,4770	0,0506	0,0488	0,01042	0,00129	
	<i>Fn = 1,50 м²</i>						
Бензин	0,13284	0,13200	0,01765	0,01754	0,13219	-0,00019	0,00000
Ацетон	0,12813	0,12900	0,01642	0,01653	0,12746	0,00154	0,00000
Гексан	0,11220	0,11100	0,01259	0,01245	0,11145	-0,00045	0,00000
Этанол	0,05855	0,05400	0,00343	0,00316	0,05754	-0,00354	0,00001
Керосин	0,04465	0,04400	0,00199	0,00196	0,04357	0,00043	0,00000
ДТ	0,03198	0,03300	0,00102	0,00106	0,03084	0,00216	0,00000
$\sum_{j=1}^n a_j$					S ₁	S ₂	
	0,5083	0,5030	0,0531	0,0527	0,00971	0,00123	

ПРИЛОЖЕНИЕ Ж

Результаты экспериментальных значений критической высоты «сухого» слоя гранулированного пеностекла, параметров испарения и горения углеводородных жидкостей с экраном в виде слоя гранулированного пеностекла

Таблица Ж.1 – Результаты экспериментальных значений интенсивности испарения углеводородных жидкостей и критической высоты «сухого» СГП

Вид ЛВЖ	$H_{кр}$, м	Площадь поддона F_n , м ²				$W \cdot 10^{-3}$, кг/м ² ·с
		0,018	0,35	1,00	1,50	
Диз. топливо	0,020	0,000505				0,0006
	0,030		0,000588			
	0,032			0,00068		
	0,033				0,000721	
Керосин авиац.	0,031	0,000623				0,0009
	0,039		0,000955			
	0,041			0,001082		
	0,044				0,001128	
Этанол	0,043	0,00141				0,0014
	0,052		0,001318			
	0,052			0,001408		
	0,054				0,001429	
Гексан	0,073	0,002201				0,0022
	0,102		0,001959			
	0,108			0,002347		
	0,111				0,002306	
Ацетон	0,078	0,002541				0,0025
	0,110		0,002265			
	0,122			0,002569		
	0,129				0,002647	
Бензин АИ-92	0,085	0,002536				0,0025
	0,114		0,00239			
	0,123			0,00259		
	0,132				0,002667	

Таблица Ж.2 – Результаты оценки критической удельной массовой скорости выгорания углеводородных жидкостей и параметра x

Вид ЛВЖ	x	Площадь поддона $F_n, \text{ м}^2$				$m_{кр} \cdot 10^{-3},$ кг/м ² ·с
		0,018	0,35	1,00	1,50	
ДТ	0,01974	0,051				0,06
	0,02849		0,06			
	0,03121			0,07		
	0,03198				0,075	
Керосин авиац.	0,02698	0,070				0,10
	0,03977		0,106			
	0,04357			0,119		
	0,04465				0,123	
Этанол	0,03614	0,140				0,14
	0,05216		0,133			
	0,05714			0,145		
	0,05855				0,15	
Гексан	0,06779	0,225				0,22
	0,09996		0,192			
	0,10950			0,23		
	0,11220				0,226	
Ацетон	0,07742	0,259				0,26
	0,11415		0,231			
	0,12504			0,262		
	0,12813				0,27	
Бензин АИ-92	0,08027	0,266				0,27
	0,11835		0,251			
	0,12964			0,272		
	0,13284				0,28	

ПРИЛОЖЕНИЕ 3

Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ и акты внедрения

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ


RU2021664032

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ
ГОСУДАРСТВЕННАЯ РЕГИСТРАЦИЯ ПРОГРАММЫ ДЛЯ ЭВМ

Номер регистрации (свидетельства):
2021664032
Дата регистрации: 27.08.2021
Номер и дата поступления заявки:
2021663342 20.08.2021
Дата публикации и номер бюллетеня:
27.08.2021 Бюл. № 9
Контактные реквизиты:
shiryayev@bk.ru

Автор(ы):
Ширяев Евгений Викторович (RU)
Правообладатель(и):
Ширяев Евгений Викторович (RU)

Название программы для ЭВМ:

«Пожарная безопасность локальных проливов горючих жидкостей»

Реферат:

Программа предназначена для определения геометрических параметров слоя гранулированного пеностекла, обеспечивающего гашение пламени горючих жидкостей в поддонах для сбора локальных проливов горючих жидкостей и может применяться на производствах, связанных с обращением горючих жидкостей, где возможны локальные утечки, например, на нефтехимических предприятиях, складах нефти и нефтепродуктов и т.п. Программа позволяет определять необходимый объем, общую высоту слоя гранул пеностекла и минимальную высоту «сухого» слоя, образующегося при всплывании гранул пеностекла, обеспечивающего гашение пламени в поддонах для сбора локальных проливов углеводородных жидкостей, выполняет расчет капиллярного подъема уровня жидкости и минимальной высоты поддона с учетом максимального объема ожидаемой утечки жидкости. Программа выполняет автоматический расчёт свободного объема поддона с учетом геометрических параметров слоя гранулированного пеностекла, прогнозирование возникновения переливов и необходимости оснащения поддона сливным патрубком для отведения жидкости в аварийную емкость.

Язык программирования: PHP, библиотека jQuery

Объем программы для ЭВМ: 16,3 МБ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2021664032

«Пожарная безопасность локальных проливов горючих жидкостей»

Правообладатель: *Ширяев Евгений Викторович (RU)*Автор(ы): *Ширяев Евгений Викторович (RU)*

Заявка № 2021663342

Дата поступления 20 августа 2021 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 27 августа 2021 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев

Акты внедрения

УТВЕРЖДАЮ

Временно исполняющий обязанности
начальника Ивановской пожарно-
спасательной академии ГПС МЧС России
полковник внутренней службы
В.В. Булгаков
«21»  2021 г.

АКТ

внедрения компьютерной программы для ЭВМ «Пожарная безопасность локальных проливов горючих жидкостей» (Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2021664032 от 27.08.2021, Бюл. №9) в образовательный процесс Ивановской пожарно-спасательной академии ГПС МЧС России

Комиссия в составе начальника учебно-научного комплекса «Государственный надзор» полковника внутренней службы, канд. техн. наук, доцента Самойлова Д.Б., начальника кафедры пожарной безопасности объектов защиты (в составе учебно-научного комплекса «Государственный надзор») подполковника внутренней службы, канд. техн. наук, доцента Комелькова В.А., профессора кафедры пожарной безопасности объектов защиты (в составе УНК «Государственный надзор»), доктора технических наук, старшего научного сотрудника Никифорова А.Л., доцента кафедры пожарной безопасности объектов защиты (в составе УНК «Государственный надзор»), кандидата технических наук, доцента Попова В.И. составила настоящий акт о том, что в образовательный процесс кафедры пожарной безопасности объектов защиты (в составе УНК «Государственный надзор») внедрена компьютерная программа для ЭВМ «Пожарная безопасность локальных проливов горючих жидкостей» (Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2021664032 от 27.08.2021, Бюл. №9) при изучении дисциплины «Пожарная безопасность технологических процессов».

Компьютерная программа предназначена для определения геометрических параметров слоя гранулированного пеностекла, обеспечивающего гашение пламени горючих жидкостей в поддонах для сбора локальных проливов горючих жидкостей.

Председатель комиссии:
начальник УНК «Государственный надзор»
полковник внутренней службы,
кандидат технических наук, доцент

 Д.Б. Самойлов

Члены комиссии:
начальник кафедры
пожарной безопасности объектов защиты
(в составе УНК «Государственный надзор»)
подполковник внутренней службы,
кандидат технических наук, доцент

 В.А. Комельков

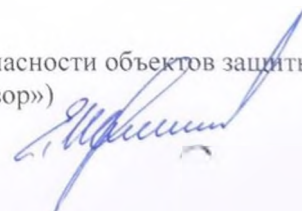
профессор кафедры
пожарной безопасности объектов защиты
(в составе УНК «Государственный надзор»)
доктор технических наук,
старший научный сотрудник

 А.Л. Никифоров

доцент кафедры пожарной безопасности объектов защиты
(в составе УНК «Государственный надзор»)
кандидат технических наук, доцент

 В.И. Попов

Автор:
преподаватель кафедры пожарной безопасности объектов защиты
(в составе УНК «Государственный надзор»)
майор внутренней службы

 Е.В. Ширяев



«УТВЕРЖДАЮ»

Генеральный директор
 ООО «ЧИСТЫЙ МИР М»

доктор экономических наук
 В.М. Петровский

«28» сентября 2021 г.



АКТ

внедрения результатов диссертационной работы Ширяева Евгения Викторовича на тему: «Снижение пожарной опасности локальных проливов углеводородных жидкостей на основе применения гранулированного пеностекла»

Комиссия в составе: Технического директора Федотова В.В., Ведущего инженера Журавлева А.Г. и Инженера по промышленной безопасности Павловского А.В. подтверждает, что результаты диссертационной работы Ширяева Е.В. по применению гранулированного пеностекла, обеспечивающего гашение пламени углеводородных жидкостей при локальных проливах используются при обеспечении пожарной безопасности техники пред ремонтной подготовки нефтяных резервуаров в процессе выполнения работ ООО «Чистый мир М».

Председатель комиссии д.э.н.

В.М. Петровский

Члены комиссии

В.В. Федотов

А.Г. Журавлев

А.В. Павловский

ООО «ГАЗПРОМНЕФТЬ-ТЕРМИНАЛ»

ОБЩЕСТВО С ОГРАНИЧЕННОЙ ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ
«ГАЗПРОМНЕФТЬ-ТЕРМИНАЛ»
(ООО «Газпромнефть-Терминал»)

Россия, 630099, Новосибирск, ул. Максима Горького, дом 80, пом. 13
ОГРН 1205400036710, ИНН 5406807595

Адрес для корреспонденции:
Россия, 620073, Екатеринбург, а/я 110
Адрес для экспресс-корреспонденции:
Россия, 191014, г. Санкт-Петербург,
Парадная ул., дом 3, корп. 1, офис 34
тел.: +7 (343) 227-52-00
e-mail: terminal@gazprom-neft.ru
http://www.gazprom-neft.ru

И.о. ЗГД по Ивановской нефтебазе

ООО «Газпромнефть Терминал»

Н.В. Коробов

«29» сентября 2021г.



АКТ

внедрения результатов диссертационной работы Ширяева Евгения Викторовича на тему: «Снижение пожарной опасности локальных проливов углеводородных жидкостей на основе применения гранулированного пеностекла»

Комиссия в составе:

Инженер-энергетик
ведущего специалиста
мастера смены

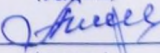
Дерябкин М.А.,
Афониная Л.В.,
Кузнецов О.Н..

подтверждает, что поддоны с гранулированным пеностеклом марки «Термоизол», разработанные по «Методике определения геометрических параметров слоя гранулированного пеностекла, обеспечивающего гашение пламени углеводородных жидкостей в поддонах для сбора локальных проливов», и рекомендациям по их применению используются 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.

Председатель комиссии

Члены комиссии


(подпись) Дерябкин М.А.


(подпись) Афониная Л.В.


(подпись) Кузнецов О.Н.

Н.В. Коробов
8(910)982-30-40