

На правах рукописи



Халиков Вадим Данисович

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДА РАСЧЕТА ПЛОЩАДИ
АВАРИЙНОГО ПРОЛИВА НЕФТИ ДЛЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ
ТРУБОПРОВОДОВ**

Специальность 05.26.03 – «Пожарная и промышленная
безопасность» (нефтегазовая отрасль)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Уфа - 2017

Работа выполнена на кафедре «Технологические машины и оборудование»
ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Хафизов Фаниль Шамильевич

Официальные оппоненты: **Поникаров Сергей Иванович,**
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВПО «Казанский научный
исследовательский технологический
университет» / кафедра «Машины и
аппараты химических производств»,
заведующий кафедрой

Калач Андрей Владимирович,
доктор химических наук, профессор,
ФГБОУ ВО «Воронежский институт ГПС
МЧС России», заместитель начальника
по научной работе

Ведущая организация: ООО «Волго-Уральский научно-исследова-
тельный и проектный институт нефти и
газа» (г. Оренбург)

Защита состоится 24 ноября 2017 года в 11:30 на заседании диссертационного
совета Д 212.289.05 при ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной
технический университет» по адресу: 450062, г. Уфа, ул. Космонавтов, 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Уфимский
государственный нефтяной технический университет» и на сайте
<http://www.rusoil.net>.

Автореферат диссертации разослан «___» _____ 2017 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Абуталипова Елена Мидхатовна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Стабильность и безопасность функционирования предприятий нефтепродуктообеспечения и нефтепереработки, как известно, во многом определяется надежностью систем внутрицехового и межцехового трубопроводного транспорта. Согласно статистическим данным количество аварий на технологических трубопроводах, большинство из которых по причине их разгерметизации, составляет 31,2 % от общего числа аварий рассматриваемых объектов.

Анализ последствий разгерметизации технологических трубопроводов свидетельствует о том, что после утечки нефти из трубопровода в 36% случаев реализовывался сценарий пожара пролива, а в 49 % - выход большого количества нефти, который приводил к образованию значительной поверхности испарения, скоплению и в дальнейшем к взрыву паровоздушной смеси (ПВС). Оба сценария характеризуются сложными процессами развития и носят затяжной характер, что в последствие, сопровождается значительными затратами сил и средств пожарных подразделений, принимающих участие в ликвидации последствий аварий данного типа.

Согласно положениям ФЗ № 123 «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности» выполнение условий соответствия объектов защиты требованиям пожарной безопасности предполагает определение расчетных величин пожарного риска на производственных объектах для оценки безопасности обслуживающего персонала. Выявление степени угрозы при различных сценариях развития пожаровзрывоопасных аварийных ситуаций, предопределяет определение уровня пожарной опасности и показателей опасных факторов пожара (взрыва) на различном расстоянии от очага пожара или эпицентра взрыва, наиболее значимым из которых является площадь пролива.

Как показывает практика в существующих методах и нормативно-законодательных положениях по оценке пожарного риска отсутствует единый подход при определении площади пролива жидкостей вследствие разгерметизации технологического оборудования, а именно: не учитывается влияние на пролив нефти физико-химических свойств жидкостей, физических свойств поверхностей и технологических параметров транспортировки жидкости в трубопроводах; не

учитываются гидродинамические характеристики истечения нефти при аварийной разгерметизации технологического трубопровода.

Таким образом, исследование влияния технологических параметров и физико-химических свойств транспортируемой нефти на площадь ее пролива при аварийном истечении из технологического трубопровода является актуальной задачей.

Соответствие паспорту заявленной специальности

Тема и содержание диссертационной работы соответствуют формуле специальности 05.26.03 Пожарная и промышленная безопасность (нефтегазовая отрасль) – «научное обоснование принципов и способов обеспечения промышленной и пожарной безопасности на предприятиях промышленности, строительства и на транспорте» (п.3); «разработка научных основ, моделей и методов исследования процессов горения, пожаро- и взрывоопасных свойств веществ, материалов, производственного оборудования, конструкций, зданий и сооружений» (п.5); «исследование и разработка средств и методов, обеспечивающих снижение пожарной и промышленной опасности технологических процессов, предупреждения пожаров и аварий, тушения пожаров» (п.6).

Степень разработанности выбранной темы

Определение площади пролива различных пожароопасных жидкостей в отечественной науке проводили следующие авторы: Швырков С.А., Алексеев С.В., Козлов М.А., Алексеев М.В., Нгуен К.В., Волков О.М., Воробьев В.В., Шайбаков Р.А., Сучков В.П. В работах перечисленных авторов не встречались результаты исследований пролива нефти непосредственно из технологических трубопроводов.

Существуют результаты исследований площади пролива из емкостного оборудования (резервуары вертикальные стальные), из патрубка автоцистерны на автозаправочной станции, однако их можно использовать только на подобном технологическом оборудовании, что не обеспечит противопожарную защиту объектов нефтегазовой отрасли при аварийной разгерметизации технологического трубопровода.

Цель работы – обеспечение защиты объектов нефтегазовой отрасли, эксплуатируемых на открытых технологических площадках от поражающих факторов пожара на основе достоверной оценки площади пролива нефти при

аварийном истечении из технологических трубопроводов.

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

1 Аналитический обзор аварий технологических трубопроводов и методов определения площади пролива нефти;

2 Разработка научно-обоснованного метода определения площади пролива нефти при аварийной разгерметизации технологического трубопровода;

3 Определение основных факторов, влияющих на площадь пролива нефти при аварийном истечении из технологического трубопровода;

4 Исследование влияния физико-химических свойств углеводородных сред и технологических параметров их транспортировки, физических свойств поверхностей на площадь пролива нефти при аварийной разгерметизации технологического трубопровода.

Методология и методы исследования

При решении поставленных задач использовались методы математической статистики, «Методика определения расчетных величин пожарного риска на производственных объектах», основанная на действующих нормативных документах по пожарной безопасности (методика утверждена приказом №404 МЧС РФ от 10.07.2009 г.).

Научная новизна

1 Предложен новый автоматизированный метод определения границ области аварийного пролива нефти путем ее идентификации на фотографических изображениях по изменению диапазона градации цвета. Установлено, что для нефти диапазон градации цвета лежит в интервале от 0 до 17.

2 Получена многопараметрическая зависимость площади пролива нефти от ее кинематической вязкости, фильтрационных свойств поверхности, расхода и времени истечения продукта из образовавшегося аварийного отверстия при разгерметизации технологического трубопровода, позволяющая достоверно определить величину пожарного риска и спрогнозировать возможные последствия аварийного пролива нефти при сохранении высокой достоверности получаемых результатов.

Теоретическая и практическая значимость

Теоретическая значимость работы заключается в научном обосновании предлагаемого усовершенствованного метода определения площади аварийного пролива нефти, что позволяет прогнозировать развитие пожароопасной ситуации.

Практическая значимость работы заключается в следующем:

1 Полученная зависимость по определению площади аварийного пролива нефти используется при проведении расчетов в «Плане тушения пожара на ЛЭПСУ «Орск» ФГКУ «5 отряд ФПС по Оренбургской области» для определения площади пролива нефти при аварийной разгерметизации технологического трубопровода.

2 Программа для ЭВМ «Исследование геометрических параметров разлива жидкостей на горизонтальных поверхностях» (Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2014610352, дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ 09.01.2014 г.) внедрена в учебный процесс для проведения лабораторных и практических занятий на кафедрах «Пожарная безопасность технологических процессов» и «Пожарной тактики и службы» в Уральском институте ГПС МЧС России.

Положения, выносимые на защиту

1 Результаты исследований по предложенной методике определения площади аварийного пролива нефти с применением разработанных компьютерной программы и стенда технологического трубопровода. Относительная погрешность измерений площади пролива по предложенному методу, не превышает $\varepsilon_A = 9,7\%$.

2 Установленная зависимость площади пролива нефти от физико-химических свойств жидкостей, физических свойств поверхностей и технологических параметров транспортировки нефти в трубопроводах позволяет достоверно определить величину индивидуального пожарного риска при возникновении аварийной ситуации пролива нефти по причине разгерметизации технологического трубопровода.

3 Разработанный алгоритм обработки фотографии пролитой нефти при аварийной разгерметизации технологического трубопровода для определения площади пролива нефти и установленный диапазон градации цвета нефти, который не превышает значения [17;17;17] для каждого из трех основных цветов RGB фотографических изображений позволяют достоверно определить площадь пролива нефти.

Степень достоверности и апробация результатов

Степень достоверности результатов проведенных исследований подтверждается использованием сертифицированного программного комплекса Microsoft Office Professional Plus 2010 Sngl Academic OPEN 1 License No Level (версия 2010, лицензия №60617449); сертифицированного программного обеспечения серии STATISTICA (версия 6.1, серийный номер №AXXR110F115431FAN10); сертифицированного вспомогательного программного комплекса Fire Sim (версия 2.0.1 от 14 декабря 2012 года, исключительные права на использование принадлежат МЧС России). Достоверность результатов полигонных исследований площади пролива обеспечена использованием современной измерительной техники на основе ЭВМ, а также сравнением с данными, приведенными в научной и нормативной литературе.

Основные положения диссертационной работы доложены и обсуждены на научно-практической конференции при Уральском институте ГПС МЧС России (г. Екатеринбург, 2012 г.); международной научно-практической конференции (г. Уфа, 2013 г.); VIII-й Международной научно-практической конференции (г. Иваново, 2013 г.); международной конференции молодых ученых НИИ ПБ и ПЧС МЧС Республики Беларусь (г. Минск, 2013 г.); VIII-й Международной научно-практической конференции молодых ученых: курсантов (студентов), слушателей магистратуры и адъюнктов (аспирантов): Командно-инженерный институт МЧС Республики Беларусь (г. Минск, 2014 г.); XXIV-й Международной научно-практической конференции: Академия Гражданской защиты МЧС России (г. Химки, 2014 г.); межвузовской конференции: Уральский институт ГПС МЧС России (г. Екатеринбург, 2014 г.).

Публикации

Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 19 научных трудах, в том числе в 5 ведущих рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК Министерства образования и науки РФ. Получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Структура и объем работы

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, основных выводов, библиографического списка использованной литературы, включающего 98

наименований. Работа изложена на 129 страницах машинописного текста, содержит 30 рисунков, 40 таблиц и 6 приложений.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении приведена общая характеристика диссертации, сформулированы цель и задачи исследований, научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы.

В первой главе представлены результаты анализа аварий на объектах нефтегазовой отрасли, согласно которым за последние 5 лет произошло увеличение количества аварий на технологических трубопроводах. Также были определены наиболее вероятные сценарии развития аварийных ситуаций при истечении нефти из технологических трубопроводов: взрыв паровоздушной смеси (49%) и пожар пролива (36%). При этом данные сценарии сопровождаются крупным материальным ущербом, что объясняется проливом нефти на большие площади, в результате при взрыве или воспламенении паров жидкости в зону поражения попадает вблизи расположенное технологическое оборудование.

При оценке последствий аварийных проливов из технологических трубопроводов были установлены факторы, которые необходимо учесть при прогнозировании площади пролива нефти: время истечения нефти, расход истечения нефти из трубопровода, физико-химические свойства нефти, физические свойства поверхностей.

На основе анализа аварий технологических трубопроводов и возможных последствий было установлено, что для снижения пожарной опасности производственных объектов, а также уменьшения материального ущерба вопрос разработки научно-обоснованного метода определения площади пролива нефти при аварийной разгерметизации технологических трубопроводов является актуальным.

Во второй главе представлен результат анализа расчетных и экспериментальных методов определения площади пролива пожароопасных жидкостей, который показал, что в ряде нормативных документов (ГОСТ Р 12.3.047-2012, СП12.13130-2009) при расчете площади пролива учитываются свойства жидкостей, в других же («Методика по определению расчетных величин пожарного риска на

производственных объектах» приказ №404 МЧС РФ от 10.07.2009 г.) - только свойства поверхностей. Также было установлено, что экспериментального стенда для проведения исследований площади пролива на технологических трубопроводах не существует. В связи с этим наиболее актуальным является разработка научно-обоснованного метода определения площади пролива нефти с использованием модели стенда технологического трубопровода.

Для повышения достоверности результатов эксперимента предлагается определить значение площади пролива нефти по фотографиям. Для этого нами разработана компьютерная программа «Исследование геометрических параметров разлива жидкостей на горизонтальных поверхностях», которая позволяет рассчитать площадь пролива различных жидкостей по твердым поверхностям. Для обработки результатов эксперимента необходимо загрузить в программу предварительно полученные оператором снимки.

Алгоритм работы программы представлен на рисунке 1.

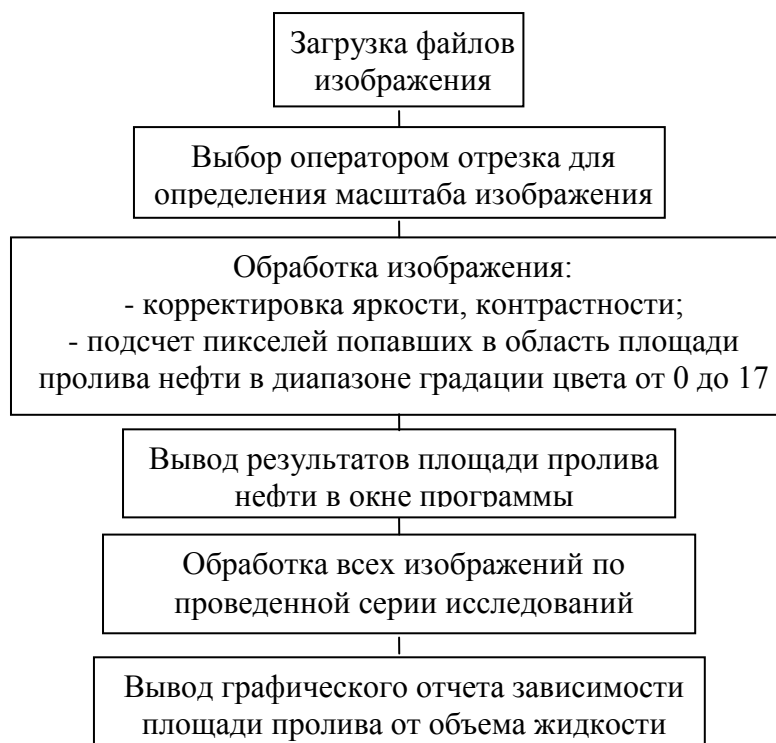


Рисунок 1 – Алгоритм нахождения площади пролива

Каждый оттенок пикселя на полученных изображениях представлен сочетанием красного (Red), зеленого (Green) и синего (Blue) цветов (цветное

изображение в формате RGB). Каждый оттенок имеет соотношение этих трех основных цветов в диапазоне от 0 до 255 (черный цвет обозначается в диапазоне [0;0;0], белый цвет в диапазоне [255;255;255] и т.д.).

По имеющимся снимкам пролива нефти был установлен диапазон градации цвета нефти, который не превышает значения [17;17;17] для каждого из трех основных цветов RGB изображения (рисунок 2).

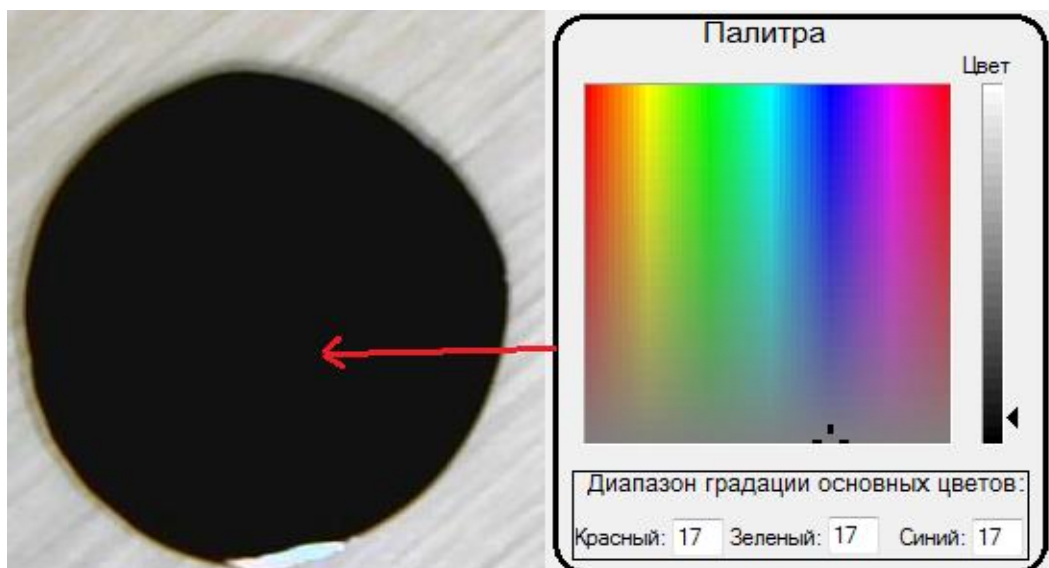


Рисунок 2– Диапазон градации основных цветов для нефти

В программе при анализе и обработке цветных изображений пролива нефти на начальном этапе производится разделение диапазонов градации цветов RGB изображения установленным значениям для нефти. Далее программа подсчитывает все пиксели на изображении, соответствующие цвету нефти, при этом определяются условные границы области пролива.

При помощи разработанной программы были проведены лабораторные исследования по проливу нефти и выявлению влияния на площадь пролива свойств поверхностей, физико-химических свойств жидкостей и технологических параметров движения нефти в трубопроводах.

По результатам эксперимента был рассчитан коэффициент корреляции Пирсона для физических свойств поверхностей (таблица 1) и физико-химических свойств жидкостей (таблицы 2, 3). Оценка статистической достоверности, проводимая по расчету корреляционной поправки, показала, что полученные коэффициенты не являются случайными.

Анализ корреляции площади пролива и рассматриваемых свойств проведен

через радиус пролившейся нефти. Форма пролива при этом приравнивалась кругу.

Таблица 1 – Коэффициент корреляции Пирсона (взаимосвязь радиуса пролива X и коэффициента фильтрации R_f)

для Нефти №1	для Нефти №2	для Нефти №3	для Нефти №4
0,56	0,62	0,59	0,51

Таблица 2 – Коэффициент корреляции Пирсона (взаимосвязь радиуса пролива X и плотности жидкости ρ)

для грунта (суглинок)	для грунта (супесь)	для грунта (чернозем)	для асфальта
0,68	0,65	0,67	0,61

Таблица 3 – Коэффициент корреляции Пирсона (взаимосвязь радиуса пролива X от кинематической вязкости ν)

для грунта (суглинок)	для грунта (супесь)	для грунта (чернозем)	для асфальта
0,89	0,92	0,93	0,83

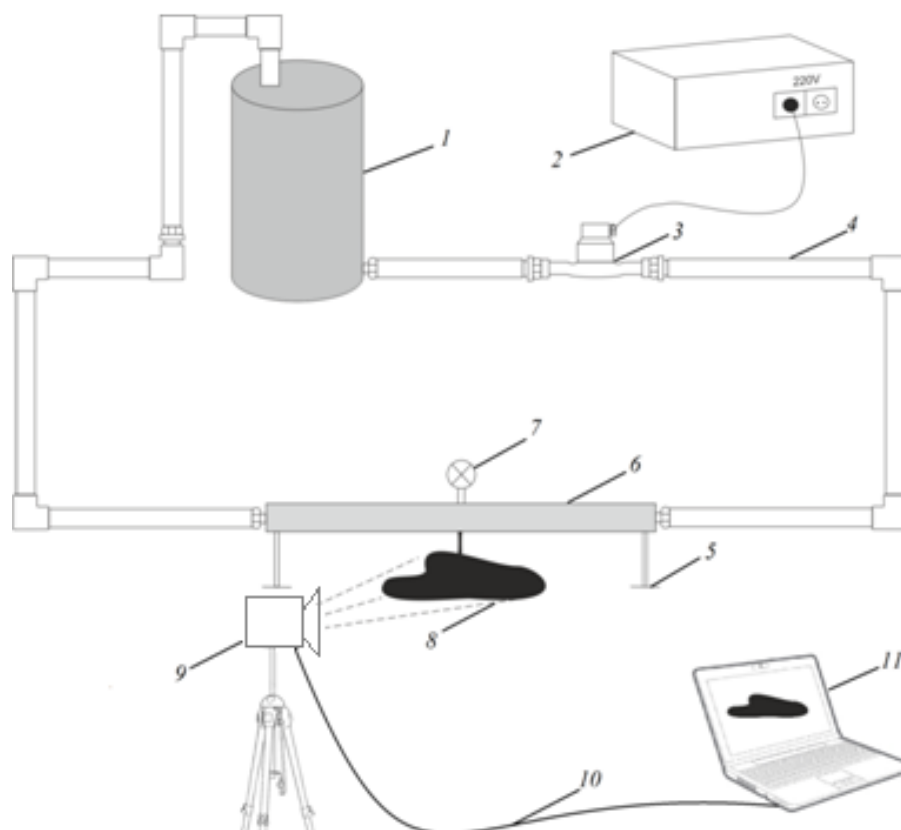
Чем ближе значение коэффициента корреляции Пирсона к 1, тем значительнее связь рассматриваемых свойств и площади пролива. Из таблиц 1, 2 и 3 можно увидеть, что на изменение радиуса пролива наибольшее влияние оказывает кинематическая вязкость жидкости. Данные исследования были проведены при малых объемах пролитой нефти и позволили лишь установить, какие свойства жидкостей и поверхностей влияют на площадь пролива больше. Для получения зависимостей площади пролива от наиболее значимых свойств необходимо проведение экспериментов на натурном технологическом трубопроводе.

Исследовать истечение нефти на натурном технологическом трубопроводе в лаборатории невозможно из-за его большого диаметра, больших и очень мощных

насосных установок, а также пожарной опасности транспортируемых жидкостей. В связи с этим была разработана модель стенда технологического трубопровода для определения площади пролива нефти на полигоне. Параметры натурального технологического трубопровода и модельного стенда представлены в таблице 4, схема стенда модельного трубопровода на рисунке 3.

Таблица 4 – Параметры натурального технологического трубопровода и модельного стенда

№ п/п	Параметр	Единица измерения	Для натурального трубопровода	Для модельного трубопровода
1.	Длина участка	м	10	2
2.	Диаметр трубопровода	м	0,25	0,05
3.	Диаметр аварийного отверстия	м	0,0125	0,0025
4.	Высота от аварийного отверстия до поверхности	м	0,4	0,08



1 – ёмкость с жидкостью ($V=200$ л); 2 – источник электроэнергии (220 V); 3 – насос; 4 – подводящий трубопровод; 5– регулируемые опоры для изменения высоты технологического трубопровода над поверхностью; 6 –трубопровод; 7 – манометр жидкостный; 8 – пролив нефти; 9 – фотоаппарат; 10 – USB-кабель; 11 – ноутбук

Рисунок 3 – Стенд-модель технологического трубопровода для проведения полигонных исследований площади пролива нефти по разработанной компьютерной программе

Моделирование технологического трубопровода проводилось согласно теории гидродинамического подобия по критерию динамического подобия Эйлера, который учитывает силу избыточного давления. При этом рабочее давление в модельном трубопроводе составило $P_m = 1,2 \text{ атм}$.

Моделирование стенда технологического трубопровода и проведенный гидравлический расчет позволили определить объем пролива нефти при трех значениях времени (таблица 5).

Таблица 5– Расчетный объем пролившейся нефти

Продолжительность истечения нефти из отверстия, с	Расчетный объем пролившейся нефти, м ³
120	0,00252
210	0,00441
300	0,0063

Для оценки совместной работы программы и стенда были проведены пробные эксперименты, по результатам которых рассчитывали абсолютную ΔA и относительную ε_A погрешности (таблица 6).

Таблица 6 – Результаты расчета абсолютной и относительной погрешностей

№ оп.	x	\bar{x}	$(x - \bar{x})$	$(x - \bar{x})^2$	$\Delta A, \text{ м}^2$	$\varepsilon_A, \%$
1.1	0,73	0,718	0,012	0,000144	$\pm 0,044242$	6,16
1.2	0,66		-0,058	0,003364		
1.3	0,75		0,032	0,001024		
1.4	0,74		0,022	0,000484		
1.5	0,71		-0,008	6,4E-05		
2.1	0,979	0,98218	-0,00318	1,01124E-05	$\pm 0,059102$	6,02
2.2	1,046		0,06382	0,004072992		
2.3	0,9379		-0,04428	0,001960718		
2.4	0,936		-0,04618	0,002132592		
2.5	1,012		0,02982	0,000889232		
3.1	1,263	1,2668	-0,0038	1,444E-05	$\pm 0,056404$	4,45
3.2	1,238		-0,0288	0,00082944		
3.3	1,297		0,0302	0,00091204		
3.4	1,325		0,0582	0,00338724		
3.5	1,211		-0,0558	0,00311364		

Общая относительная погрешность измерений площади пролива с применением разработанной компьютерной программы и стенда технологического трубопровода, а в целом и предлагаемого метода, не превышает $\varepsilon_A = 9,7\%$.

В третьей главе описывается полигонный эксперимент по определению площади пролива нефти по разработанному методу.

Эксперимент проводили для 4 видов нефти (нефть №1 - Северо-Даниловское месторождение, нефть №2 - Локосовское месторождение, нефть №3 и нефть №4 - Самотлорское месторождение пласты БВ7 и БВ8 соответственно). Физико-химические свойства нефти представлены в таблице 7.

Таблица 7 – Свойства модельных жидкостей

Свойства жидкости	Нефть №1	Нефть №2	Нефть №3	Нефть №4
Плотность, [кг/м ³]	735	860	845	864,3
Кинематическая вязкость, м ² /с	$3,25 \cdot 10^{-6}$	$4,5 \cdot 10^{-6}$	$6,49 \cdot 10^{-6}$	$14,09 \cdot 10^{-6}$

Площадь пролива нефти замеряли на 4 поверхностях:

- асфальтовое покрытие ($R_\phi = 0,000173 \text{ см} / \text{сут}$);
- грунтовая поверхность (суглинок) ($R_\phi = 20 \text{ см} / \text{сут}$);
- грунтовая поверхность (чернозём) ($R_\phi = 40 \text{ см} / \text{сут}$);
- грунтовая поверхность (супесь) ($R_\phi = 100 \text{ см} / \text{сут}$).

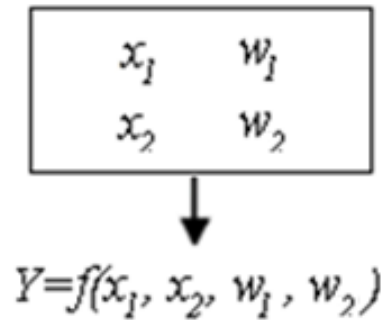
В скобках представлен коэффициент фильтрации нефти.

Процесс аварийного пролива нефти из технологических трубопроводов характеризуется наличием значительного числа разнообразных факторов, которые были представлены в виде «черного ящика» (рисунок 4).

Факторы в черном ящике разбиты на две группы:

- первая группа составляет управляемые параметры, т.е. такие, которые можно измерять и целенаправленно изменять (факторы x_1 и x_2);
- вторая группа образует контролируемые, но не управляемые параметры, характеризующиеся состоянием функций отклика на операциях, предшествующих

исследуемому процессу (факторы w_1 и w_2).



x_1 – расход истечения жидкости из аварийного отверстия в технологическом трубопроводе;
 x_2 – время истечения жидкости из аварийного отверстия; w_1 – коэффициент фильтрации;
 w_2 – кинематическая вязкость жидкости.

Рисунок 4 – Факторы, входящие в черный ящик, при проведении экспериментов по исследованию площади пролива нефти

Таким образом, при проведении исследований площади пролива на полигоне будут учитываться 4 фактора:

- X_1 – расход истечения жидкости из аварийного отверстия, $Q_{ж}$;
- X_2 – время истечения жидкости из аварийного отверстия, τ ;
- X_3 – кинематическая вязкость нефти, ν ;
- X_4 – коэффициент фильтрации нефти в грунт, R_{ϕ} .

Для подтверждения достоверности предлагаемого метода в работе площадь пролива определяли дополнительно по двум методам: метод Монте-Карло и механический метод (квадратная палетка).

Результаты площади пролива по 3 методам (1-разработанный метод; 2-метод Монте-Карло; 3-механический метод, с использованием квадратной палетки) приведены в таблице 8.

По критерию Стьюдента проводился отсев грубых погрешностей измерения, который показал, что полученные данные могут быть использованы для дальнейшей обработки.

По результатам получившихся значений площади пролива нефти (таблица 8) высчитывались относительные погрешности (таблица 9).

Таблица 8 – Результаты исследований площади пролива нефти

	Объем жидкость $V_{ж}, м^3$	Площадь пролива на асфальте $F_{np}, м^2$			Площадь пролива на грунте (суглинок) $F_{np}, м^2$			Площадь пролива на грунте (чернозем) $F_{np}, м^2$			Площадь пролива на грунте (супесь) $F_{np}, м^2$		
		1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Нефть №1													
Метод ¹ :		1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
	0,00252	1,18	1,19	1,23	0,16	0,15	0,12	0,12	0,13	0,1	0,04	0,04	0,08
	0,00441	1,25	1,25	1,28	0,49	0,49	0,37	0,37	0,37	0,26	0,14	0,15	0,19
	0,0063	2,12	2,11	2,1	0,67	0,66	0,58	0,57	0,57	0,42	0,24	0,25	0,33
Нефть №2													
Метод ¹ :		1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
	0,00252	1,04	1,03	1,01	0,42	0,43	0,38	0,32	0,32	0,28	0,05	0,05	0,09
	0,00441	1,33	1,31	1,27	0,69	0,71	0,62	0,52	0,53	0,48	0,14	0,15	0,17
	0,0063	1,85	1,83	1,65	0,81	0,8	0,73	0,69	0,7	0,62	0,24	0,25	0,28
Нефть №3													
Метод ¹ :		1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
	0,00252	0,94	0,92	0,85	0,38	0,37	0,32	0,29	0,29	0,24	0,08	0,08	0,09
	0,00441	1,29	1,31	1,23	0,68	0,68	0,59	0,51	0,52	0,47	0,16	0,17	0,19
	0,0063	1,64	1,66	1,54	0,72	0,71	0,65	0,61	0,62	0,55	0,24	0,24	0,27
Нефть №4													
Метод ¹ :		1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
	0,00252	0,77	0,78	0,71	0,31	0,31	0,27	0,24	0,25	0,27	0,08	0,09	0,11
	0,00441	1,14	1,13	1,11	0,59	0,58	0,52	0,45	0,46	0,48	0,22	0,22	0,25
	0,0063	1,36	1,35	1,27	0,72	0,73	0,67	0,51	0,51	0,53	0,41	0,4	0,38

Примечание: ¹Метод определения площади пролива нефти:

1– разработанный метод;

2– метод Монте-Карло;

3– механический метод с использованием квадратной палетки.

Таблица 9 –Относительные погрешности при определении площади пролива нефти по 3 методам

Погрешность	Метод определения площади пролива нефти		
	Разработанный метод	Метод Монте-Карло	Механический метод (квадратная палетка)
Относительная погрешность $\varepsilon_A, \%$	9,7 %	>21 %	15,8%

Из таблицы 9 следует, что относительная погрешность площади пролива нефти по разработанному методу ниже в сравнении с методом Монте-Карло и механическим методом, что позволит повысить достоверность полученных результатов не менее чем в 1,5 раза.

Далее при помощи интегрированной системы анализа и управления данными (программный комплекс «STATISTICA») по методу наименьших квадратов была получена зависимость площади пролива от физико-химических свойств жидкостей,

физических свойств поверхностей и технологических параметров транспортировки нефти в трубопроводах:

$$F_{\text{пр}} = Q \cdot \tau \cdot \sqrt{\frac{a}{\nu \cdot R_{\phi}}}, \quad (1)$$

где: ν – кинематическая вязкость жидкости, $\text{м}^2/\text{с}$; τ – время истечения жидкости из аварийного отверстия в технологическом трубопроводе, с ; Q – расход истечения жидкости из аварийного отверстия в технологическом трубопроводе, $\text{м}^3/\text{с}$; R_{ϕ} – коэффициент фильтрации, $\text{м}/\text{с}$; a – параметр, характеризующий динамику движения жидкости (определяется экспериментально), $\text{м}/\text{с}^2$.

Исследуя параметр a , характеризующий динамику движения жидкости, были выявлены зависимости, представленные в таблице 10.

Таблица 10 – Зависимость параметра, a от вида поверхности, нефти и эмпирических коэффициентов, основанных на обработке результатов полевых экспериментов

	ν_1	ν_2	ν_3	ν_4
$R_{\phi 1}$	$a = \frac{3,9 \cdot 10^8 \cdot \nu \cdot R_{\phi}}{g \cdot d \cdot t^2}$	$a = \frac{3 \cdot 10^8 \cdot \nu \cdot R_{\phi}}{g \cdot d \cdot t^2}$	$a = \frac{2,45 \cdot 10^8 \cdot \nu \cdot R_{\phi}}{g \cdot d \cdot t^2}$	$a = \frac{1,65 \cdot 10^8 \cdot \nu \cdot R_{\phi}}{g \cdot d \cdot t^2}$
$R_{\phi 2}$	$a = \frac{g \cdot t^2}{1,5 \cdot 10^3 \cdot d \cdot \nu} R_{\phi}^3$	$a = \frac{5 \cdot 10^7 \cdot \nu \cdot R_{\phi}}{g \cdot d \cdot t^2}$	$a = \frac{4 \cdot 10^7 \cdot \nu \cdot R_{\phi}}{g \cdot d \cdot t^2}$	$a = \frac{2,7 \cdot 10^7 \cdot \nu \cdot R_{\phi}}{g \cdot d \cdot t^2}$
$R_{\phi 3}$	$a = \frac{g \cdot t^2}{1 \cdot 10^4 \cdot d \cdot \nu} R_{\phi}^3$	$a = \frac{2,8 \cdot 10^7 \cdot \nu \cdot R_{\phi}}{g \cdot d \cdot t^2}$	$a = \frac{2,3 \cdot 10^7 \cdot \nu \cdot R_{\phi}}{g \cdot d \cdot t^2}$	$a = \frac{1,6 \cdot 10^7 \cdot \nu \cdot R_{\phi}}{g \cdot d \cdot t^2}$
$R_{\phi 4}$	$a = \frac{g \cdot t^2}{6 \cdot 10^5 \cdot d \cdot \nu} R_{\phi}^3$	$a = \frac{g \cdot t^2}{1,6 \cdot 10^5 \cdot d \cdot \nu} R_{\phi}^3$	$a = \frac{g \cdot t^2}{3,5 \cdot 10^4 \cdot d \cdot \nu} R_{\phi}^3$	$a = \frac{g \cdot t^2}{7 \cdot 10^3 \cdot d \cdot \nu} R_{\phi}^3$

Кросс-плот расчетных и экспериментальных значений площади пролива для общей многопараметрической зависимости представлен на рисунке 5.

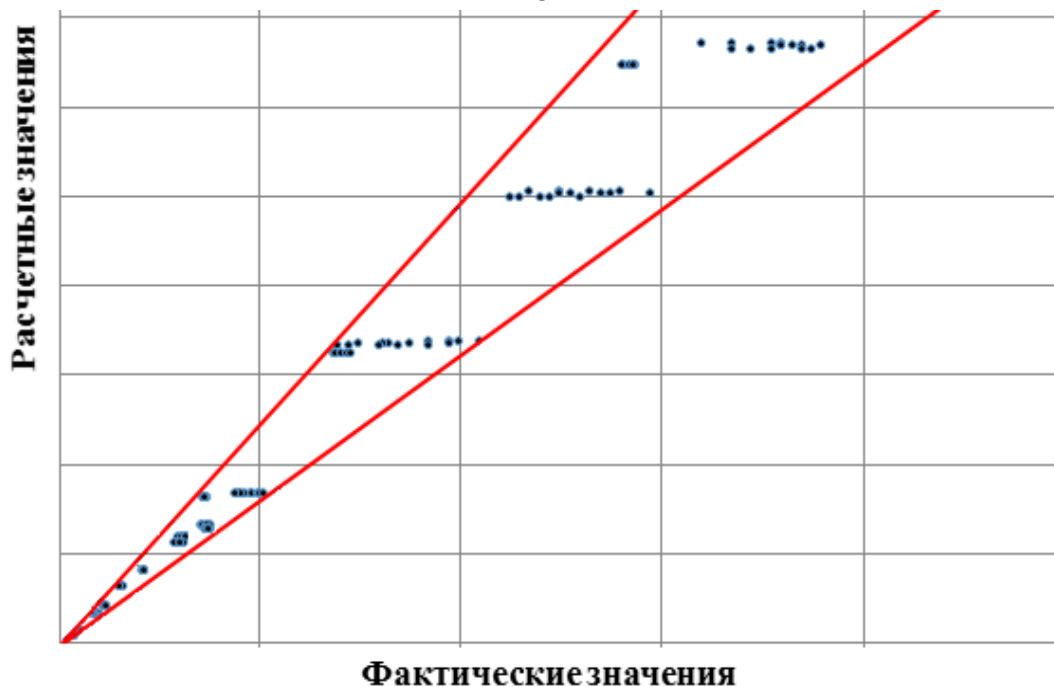


Рисунок 5 – Кросс-плот расчетных и экспериментальных значений площади

Каждая точка графика – результат объединения двух значений (фактического и расчетного) для определенного объема пролившейся нефти. Таким образом, график демонстрирует степень отклонения расчетного параметра площади пролива от фактического на выбранный объем пролива для всех используемых в эксперименте видов нефти и поверхностей, который не выходит из коридора отклонений (две красные линии) при заданном 20% отклонении. Расчетное значение выбирается по полученной зависимости, а фактическое – по результатам проведенных полигонных испытаний.

Для проверки полученной зависимости был определен пожарный риск на реальном объекте.

В четвертой главе проводилось прогнозирование площади пролива нефти по разработанному методу. Для этого были выполнены расчёты пожарных рисков для нефтепровода, расположенного на территории линейно-эксплуатационного приемосдаточного участка «Орск» (ЛЭПСУ «Орск»).

Расчет пожарных рисков для данного объекта при анализе действующих нормативных документов и предлагаемого метода проводился по двум вариантам в программе Fire Sim. Для обоих вариантов были выбраны одинаковые условия аварийной ситуации: пролив нефти на грунтовой подготовленной площадке, объем пролившейся нефти - 25,3 м³;

Результаты площади пролива нефти для двух вариантов:

$$1 \text{ вариант: } F_{np} = 506 \text{ м}^2,$$

$$2 \text{ вариант: } F_{np} = 2130,84 \text{ м}^2$$

Результаты проведенных расчетов пожарных рисков по двум вариантам представлены на рисунке в таблицах 11-12.

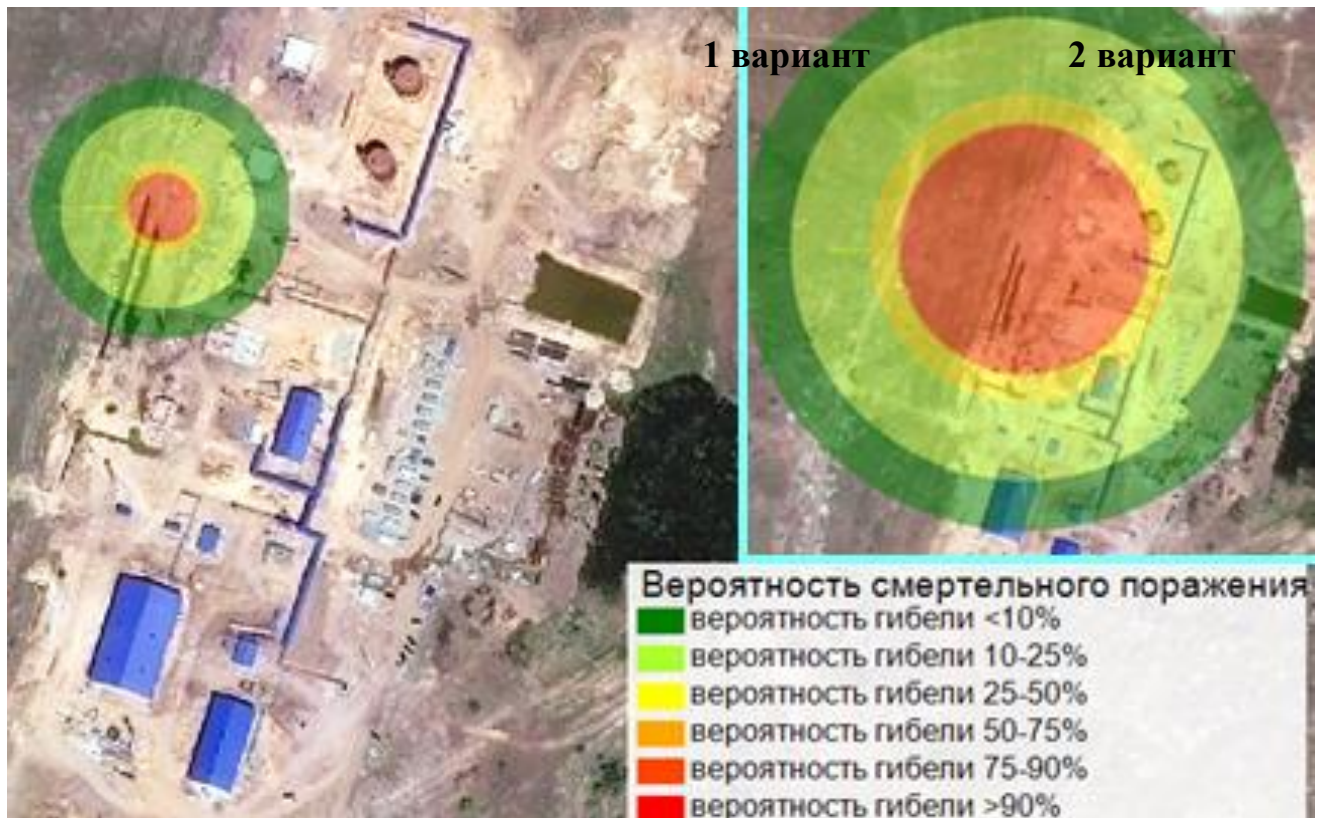


Рисунок 6 – Условная вероятность поражения для двух вариантов

Таблица 11 – Результаты расчета зон поражения по двум вариантам

Интенсивность теплового излучения по двум вариантам, кВт/м ²	Расстояние от геометрического центра пролива, м	
	по 1 варианту	по 2 варианту
17,0	52	59
12,9	57	78
10,5	60	87
7,0	67	102
4,2	76	118
1,4	104	159

Таблица 12 – Индивидуальный риск для персонала по двум вариантам

Персонал объекта	Количество, человек	Индивидуальный риск, случаев в год	
		1 вариант	2 вариант
Управленческий персонал	7	3,14E-014	7,98E-012
Операторы	6	5,87E-012	4,31E-009
Техники	7	7,43E-012	5,39E-009

Для обоих вариантов индивидуальный пожарный риск не превышает нормативных значений (таблица 12), однако при расчете 2-го варианта, площадь пролива в котором рассчитывалась по предлагаемой зависимости, возможно попадание персонала (двух операторов узла учета нефти с ТПУ и трех техников склада ХАЛ) в зону поражения опасными факторами пожара. При этом безопасным расстоянием в первом варианте является 104 м, во втором – 159 м (рисунок 7).

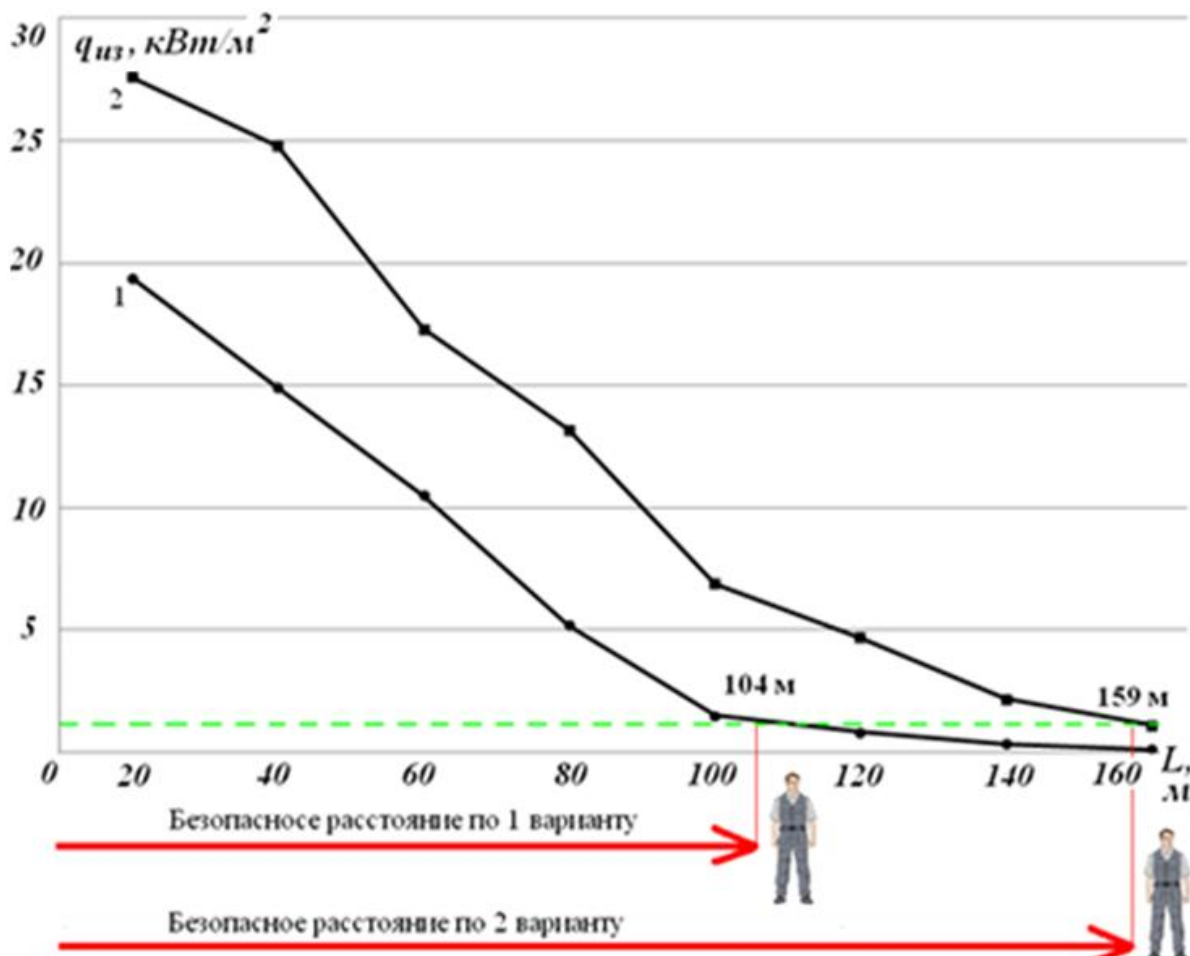


Рисунок 7 – Результаты расчета интенсивности теплового излучения на ЛЭПСУ «Орск» по 1 и 2 варианту

На рисунке 7 можно увидеть, что интенсивность теплового излучения, определенная с учетом существующей формулы для расчета площади пролива нефти (1 вариант) может привести к занижению безопасных расстояний для персонала объекта при реализации сценария «пожар пролива», что недопустимо.

В свою очередь, расчет интенсивности теплового излучения с учетом предлагаемой зависимости при определении площади пролива нефти по 2 варианту в сравнении с 1, включает в себя не только свойства поверхностей, но и физико-химические свойства жидкостей, а также технологические параметры движения жидкости в трубопроводе. При этом безопасное расстояние для персонала объекта по 2 варианту увеличится на 55 м.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Установлены наиболее вероятные и неблагоприятные сценарии разгерметизации технологического трубопровода: взрыв ПВС и пожар пролива. При их реализации важнейшей составляющей является площадь пролива нефти. Выявлены разночтения нормативных документов: в одних площадь пролива определяется, исходя из свойств поверхностей, в других площадь пролива определяется с учетом свойств жидкостей. Проведенный расчет пожарных рисков доказывает, что значение площади, определяемое по действующим нормативным документам, может быть занижено и, следовательно, обеспечение противопожарной защиты объектов нефтегазовой отрасли не выполняется. Рекомендовано прогнозирование возможных последствий аварийного пролива нефти из технологических трубопроводов по полученной зависимости.

2. Разработан научно-обоснованный метод для определения площади пролива нефти на основе результатов экспериментальной обработки изображений с учетом диапазона градации цвета нефти в пределах от 0 до 17. Для проведения полигонных исследований площади пролива нефти разработана модель стенда технологического трубопровода. Общая относительная погрешность измерений предлагаемого метода не превышает 9,7%.

3. По результатам проведенных исследований площади пролива нефти были просчитаны коэффициенты корреляции Пирсона. Установлено, что наибольшее

влияние на изменение радиуса пролива, а, следовательно, и площади пролива, оказывает кинематическая вязкость жидкости. При этом корреляционная поправка для пары «кинематическая вязкость-радиус пролива» выше допустимого значения в 10 раз, что свидетельствует о том, что полученные коэффициенты не являются случайными.

4. По результатам исследований при помощи интегрированной системы анализа и управления данными (программный комплекс «STATISTICA») получена многопараметрическая зависимость площади пролива нефти от её кинематической вязкости, фильтрации вглубь поверхности, расхода истечения из образовавшегося отверстия и времени истечения при аварийной разгерметизации. При этом коридор отклонения расчетных значений площади пролива нефти от фактических (экспериментальных) не превышает 20 %. Данная зависимость позволила достоверно определить величину индивидуального пожарного риска, минимальное значение которого на рассматриваемом объекте – ЛЭПСУ «Орск» составило $4,31E-009$, что не превышает допустимых значений. Определено безопасное расстояние для персонала объекта, при реализации сценария – «пожар пролива», равное 159 м, что в сравнении с действующими нормативными документами больше на 55 м.

Основное содержание диссертации представлены в следующих работах:

Материалы, опубликованные в ведущих рецензируемых журналах и изданиях, утвержденных ВАК РФ:

1. Халиков В.Д. Исследование разлива нефтепродуктов при авариях технологических трубопроводов / Хафизов Ф.Ш., Кокорин В.В., Халикова О.Д. // «Нефтегазовое дело». – 2014. - №3. – С. 390–403.

2. Халиков В.Д. Анализ способов определения площади разлившейся жидкости на горизонтальных поверхностях. / Кокорин В.В., Сатюков Р.С. // Научные и образовательные проблемы гражданской защиты / АГЗ МЧС России. – 2014. - Вып. №3. – С. 42–46.

3. Халиков В.Д. Оценка пожарной опасности транспорта нефтепродуктов в зависимости от площади пролива / Хафизов Ф.Ш. // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. 2015. – Вып. №5. – С. 132–136.

4. Халиков В.Д. Метод определения площади аварийного пролива нефти из технологических трубопроводов / Хафизов Ф.Ш., Субачев С.В. // Технологии техносферной безопасности. – 2017. – №2.(72). – С. 87-92.

5. Халиков В.Д. Методы определения площади нефтепродуктов на горизонтальную

поверхность / Кокорин В.В., Сатюков Р.С., Субачев С.В. // Технологии техносферной безопасности.- 2017.- №2.(72). – С. 130 - 134.

Авторские свидетельства

6. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2014610352 РФ. Исследование геометрических параметров разлива жидкостей на горизонтальных поверхностях / В.В. Кокорин, С.В. Субачев, В.Д. Халиков (РФ) – заявка № 2013660461; Заявлено 14.11.2013; Опубликовано 09.01.2014.

Материалы, опубликованные в других изданиях:

7. Халиков В.Д. Основные причины аварий магистральных трубопроводов и меры по их предотвращению / Хафизов Ф.Ш., Халикова О.Д.// Материалы Международной научно-практической конференции. Часть I. – Уфа, – 2013. – С. 331–332.

8. Халиков В.Д. Методы прогнозирования аварийных разливов нефтепродуктов / Халикова О.Д., Хафизов Ф.Ш.// Материалы Международной научно-практической конференции, Часть I. – Уфа, – 2013. –С. 330–331.

9. Халиков В.Д. Сравнительный анализ методов прогнозирования площади разлива нефтепродуктов из поврежденного технологического оборудования / Хужаев А.Т.//Материалы научно-практической конференции (5-6 декабря 2012 г.) Екатеринбург: Уральский институт ГПС МЧС России, 2013. – С. 34–38.

10. Халиков В.Д. Основные физико-механические свойства твердых подстилающих поверхностей и их влияние на площадь разлива нефтепродуктов / Сурков А.П. // Материалы научно-практической конференции (5-6 декабря 2012 г.) Екатеринбург: Уральский институт ГПС МЧС России, 2013. – С. 79–81.

11. Халиков В.Д. Статистический анализ аварий на объектах нефтегазовой отрасли / Кокорин В.В., Сатюков Р.С.//Материалы Международной конференции молодых ученых «Предупреждение и ликвидация чрезвычайных ситуаций». НИИ ПБ и ПЧС МЧС Беларуси. – Минск, 2013. – С.74 –77.

12. Халиков В.Д.. Предупреждение и ликвидация аварийных разливов магистральных трубопроводов /Сапожников И.И // Материалы Международной конференции молодых ученых «Предупреждение и ликвидация чрезвычайных ситуаций». НИИ ПБ и ПЧС МЧС Беларуси. – Минск, 2013. – С.161–164.

13. Халиков В.Д. Экспериментальное исследование пожара пролива нефтепродуктов при разгерметизации технологических трубопроводов / Хафизов Ф.Ш., Халикова О.Д. // Материалы Международной конференции молодых ученых «Предупреждение и ликвидация чрезвычайных ситуаций». НИИ ПБ и ПЧС МЧС Беларуси. –Минск, 2013. – С.164–167.

14. Халиков В.Д. Оценка степени риска аварий на магистральных нефтепроводах / Кокорин В.В., Сурков А.П., Веремко А.И., Билан Д.А. // Материалы Недели Науки «Актуальные

проблемы и инновации в обеспечении безопасности». (декабрь 2013). – Екатеринбург: Уральский институт ГПС МЧС России, 2014. – С.164–166.

15. Халиков В.Д. Сбор информации об авариях. Проблемы. Пути решения / Кокорин В.В. // Материалы Недели Науки «Актуальные проблемы и инновации в обеспечении безопасности». (декабрь 2013). – Екатеринбург: Уральский институт ГПС МЧС России, 2014. – С.76–78.

16. Халиков В.Д. Методы ликвидации разливов нефтепродуктов при авариях магистральных трубопроводов / Кокорин В.В., Мансуров Т.Х., Сатюков Р.С. // Материалы VIII-й международной научно-практической конференции молодых ученых: курсантов (студентов), слушателей магистратуры и адъюнктов (аспирантов) «Обеспечение безопасности жизнедеятельности: проблемы и перспективы». Минск: КИИ, 2014. – С. 201–202.

17. Контбойцев Е.А. Аналитическая и экспериментальная оценки пожароопасных показателей жидкого моторного топлива, используемого на автозаправочных станциях / Алексеев С.Г., Контбойцева М.Г., Халиков В.Д. // «Техносферная безопасность». – Екатеринбург: УрИ ГПС МЧС России. – №2, 2015.–С. 46 – 51.

18. Халиков В.Д. Расчетные методы определения площади пролива пожароопасных жидкостей / Хафизов Ф.Ш. // Материалы 66-ой научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых УГНТУ. – Уфа, 2015. Кн. 1.– С. 196-197.

19. Халиков В.Д. Причины и последствия аварий трубопроводного транспорта нефти / Халикова О.Д., Хафизов И.Ф.// Труды международной научно-технической конференции «Современные технологии в нефтегазовом деле». Уфа, 2016. – Т. 2. – С 406-410.

Подписано в печать 25.09.2017. Формат 60×80/1/16.
Печать офсетная. Усл. печ. л. 0,94. Тираж 120 экз.

Уральский институт ГПС МЧС России. 620062, г. Екатеринбург, ул. Мира, 22.