

На правах рукописи

КУЗНЕЦОВА СВЕТЛАНА АЛЕКСАНДРОВНА

**ПОЖАРОБЕЗОПАСНОСТЬ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ РЕЗЕРВУАРОВ
ДЛЯ ХРАНЕНИЯ НЕФТИ И НЕФТЕПРОДУКТОВ**

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

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

Уфа -2005

Работа выполнена на кафедрах «Промышленная безопасность и охрана окружающей среды» и «Теплотехника, теплогазоснабжение и вентиляция» Ухтинского государственного технического университета.

Научный руководитель

кандидат технических наук, профессор
Волков Владимир Николаевич.

Официальные оппоненты:

доктор технических наук
Хуснияров Мират Ханифович;
кандидат технических наук
Минаев Алексей Васильевич.

Ведущая организация

**Главное управление МЧС России
по Республике Коми.**

Защита состоится «9» июня 2005 года в 16-00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.289.05 при Уфимском государственном нефтяном техническом университете по адресу: 450062, Республика Башкортостан, г.Уфа, ул. Космонавтов,1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Уфимского государственного нефтяного технического университета.

Автореферат разослан «___» _____ 2005 года.

Ученый секретарь

диссертационного совета

Закирничная М.М.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

В России добываемая нефть и нефтепродукты подготавливаются, перерабатываются и хранятся в резервуарных парках. В государственном реестре опасных производственных объектов содержатся сведения почти о тысяче нефтебаз и объектов хранения нефти и нефтепродуктов. В соответствии с Федеральным Законом № 116-ФЗ «О промышленной безопасности опасных производственных объектов» от 21.07.1997 г. резервуарные парки и нефтехранилища относятся к опасным производственным объектам.

Проблема повышения промышленной безопасности резервуаров обострилась в связи с рядом обстоятельств, возникших в России в новых экономических условиях. По данным ЦНИИПСК им. Н.П. Мельникова, в настоящее время 90% эксплуатируемых резервуарных парков превысили нормативный срок эксплуатации (20 лет). Проведенный обзор аварийных ситуаций с отрывом крыши резервуара вследствие взрыва и с последующим возгоранием нефтепродукта в резервуаре со свободной поверхностью показал, что рассмотрение процессов горения нефтепродуктов в резервуаре является актуальным направлением развития науки в настоящее время.

К наиболее разрушительным последствиям приводит горение нефтепродуктов со свободной поверхностью резервуара. Изучение процесса горения имеет важное научное и прикладное значение в связи с проблемами пожаротушения, борьбы с нефтяными проливами при авариях на резервуарах.

В настоящее время при теоретическом анализе горения нефтепродуктов используются различные подходы, опирающиеся на некоторые модельные представления о механизме горения как сложного явления. Наиболее полная информация о закономерностях протекания процесса горения может быть получена при численном решении системы уравнений переноса для жидкого и газообразного реагентов. Кроме того, при изучении турбулентного горения нефтепродуктов возникают трудности физического характера, связанные с заданием коэффициентов турбулентного обмена в свободноконвективном потоке реа-

гирующего газа переменной плотности. В связи с этим большое значение приобретает развитие приближенных аналитических методов расчета горения нефтепродуктов, позволяющих определить основные характеристики процесса горения.

Учитывая, что решение проблемы прогнозирования условий протекания и последствий пожаров в резервуарах связано с сохранением человеческих жизней и снижением материального ущерба, она является достаточно актуальной.

Цель работы

Разработка аналитических методов расчета горения нефтепродуктов со свободной поверхностью резервуара с целью своевременной локализации пожаров на резервуарах для минимизации материального ущерба и человеческих жертв.

Основные задачи исследований

1. Оценка технического состояния резервуарных парков, а также анализ статистических данных по авариям резервуаров, их масштабам, особенностям и последствиям.
2. Исследование основ стационарного горения нефтепродуктов со свободной поверхностью резервуара. Разработка аналитических методов для определения основных характеристик процесса горения нефтепродуктов.
3. Исследование основных характеристик процесса горения в зависимости от конструктивных и технологических параметров резервуара.
4. Анализ изменения скорости горения в резервуарах по мере выгорания слоя нефтепродуктов с целью прогнозирования затухания горения.

Научная новизна

1. По результатам статистического обзора резервуарный парк идентифицирован как наиболее пожаро- и взрывоопасный объект перевалочной нефтебазы (ПНБ). Установлены наиболее вероятные причины и характер происхождения аварийных ситуаций.

2. Определены значимые характеристики процесса горения, позволяющие повысить достоверность прогнозирования развития пожара. Изучена их зависимость от технологических и конструктивных параметров резервуара.
3. Получена зависимость изменения скорости горения в резервуарах со свободной поверхностью при выгорании слоя нефтепродуктов для оценки затухания процесса горения.

На защиту выносятся аналитические оценки причин аварийности при эксплуатации резервуаров, теоретические выводы и обобщения, разработанные математические модели для определения основных характеристик процесса горения нефтепродуктов со свободной поверхностью резервуара с целью повышения пожаробезопасности при эксплуатации резервуаров для хранения нефти и нефтепродуктов.

Теоретическая ценность

Разработанный аналитический метод определения характеристик процесса горения более широкого спектра по сравнению с традиционными методами позволяет повысить достоверность прогнозирования развития пожара.

Практическая ценность

Полученные математические модели для определения основных характеристик процесса горения нефтепродуктов внедрены во втором отряде ГПС МЧС России по Республике Коми для разработки мероприятий по предотвращению и ликвидации взрывов и пожаров на резервуарах для хранения нефти и нефтепродуктов.

Апробация работы

Основные положения диссертации доложены и обсуждены:

- на VIII, IX Международной научно-технической конференции «Строительство. Коммунальное хозяйство. Энергосбережение» (г.Уфа, 2004, 2005);
- IV научно-технической конференции (г. Вологда, 2004);

- V Всероссийском совещании «Энергоэффективность, энергосбережение и энергетическая безопасность» (г.Томск, 2004);
- VI Международной научно-технической конференции «Севергеоэкотех» (г.Ухта, 2005).

Публикации

По материалам диссертации автором опубликовано 10 печатных работ.

Структура и объем работы

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав и основных выводов; содержит 137 страницы машинописного текста, 17 таблиц, 31 рисунок, библиографический список использованной литературы из 97 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** сформулированы актуальность темы диссертационной работы, цель и задачи исследования, основные положения, выносимые на защиту, научная новизна проведенных исследований, практическая ценность и сведения об апробации научных результатов.

Первая глава посвящена оценке современного состояния и анализу статистических данных по аварийности резервуарных парков для хранения нефти и нефтепродуктов, их масштабам, особенностям и последствиям.

В настоящее время в России и странах СНГ находится в эксплуатации более 40 тысяч вертикальных и горизонтальных цилиндрических резервуаров емкостью от 100 до 50000 м³ для хранения нефти, нефтепродуктов и агрессивных химических веществ.

Практически каждый из них представляет собой объект повышенной опасности для персонала предприятий и окружающей среды. В табл. 1 приведены данные по частоте возникновения аварий на перевалочной нефтебазе (ПНБ), полученные на основе обзора ежемесячной аварийной отчетности отрасли.

Таблица 1

Частота возникновения аварий

Место аварии	Частота возникновения аварий с появлением поражающих факторов на ПНБ, год ⁻¹
Резервуарный парк	$2,1 \cdot 10^{-2}$
Железнодорожные цистерны	$1,5 \cdot 10^{-2}$
Насосное оборудование	$1,1 \cdot 10^{-2}$
Трубопроводы	$4,6 \cdot 10^{-3}$
Всего по объекту	$5,2 \cdot 10^{-2}$

Из таблицы видно, что именно резервуары товарных производств ПНБ характеризуются наибольшим уровнем аварийности.

При оценке масштабов возможных техногенных опасностей на нефтебазах и нефтехранилищах были выделены основные сценарии развития аварий:

- наиболее опасные – взрыв наземного резервуара с нефтью с последующим воспламенением, пожаром и полным разрушением резервуара;
- наиболее вероятные – частичное разрушение насосного агрегата; локальные утечки из технологического оборудования, трубопроводов. При развитии аварий по этим сценариям возможны воспламенение нефти (нефтепродукта) и пожар пролива.

Основными поражающими факторами перечисленных аварий являются тепловое излучение, воздействие ударной волны, попадание в открытое пламя, поражение осколками.

При авариях с наиболее тяжелыми последствиями зоны поражения (разрушения) могут достигать нескольких сот метров; размер опасных зон при возникновении пожара разлива будет ограничен несколькими десятками метров от края пролива.

В случае реализации рассматриваемых аварийных ситуаций возможно разрушение смежного по промплощадке оборудования. Это обстоятельство способствует увеличению площади зоны поражения.

Установленные особенности эксплуатации резервуаров (парков) и основные причины возникновения пожаров потребовали разработки новых методов и уточнения существующих алгоритмов теории горения нефтепродуктов с целью прогнозирования развития сценариев аварийной ситуации.

Исследованию закономерностей горения нефтепродуктов со свободной поверхностью резервуара посвящено значительное количество экспериментальных и теоретических работ, направленных на изучение механизма процесса горения, тепломассопереноса в реагирующей жидкости и газовом факеле над свободной поверхностью резервуара, высоты пламени и др. (Ассовский И.Г., Гуджиев А.В., Сухов Г.С., Горшков В.И. и др.)

В работах приводятся подробные данные по изменению размеров пламени в зависимости от режима горения и конструктивных характеристик резервуара. При ламинарном горении относительная высота факела сначала увеличивается, потом уменьшается с ростом диаметра резервуара d , а в турбулентном пламени практически не зависит от диаметра резервуара d .

Значительная часть экспериментальных работ (Зельдович Я.Б., Лейпуновский О.И., Смирнов Н.Н., Баренблатт Г.И., Ярин Л.П. и др.) посвящена исследованию скорости горения нефтепродуктов, высоты и формы факела, механизма теплопередачи. В работах изучалась зависимость скорости горения от природы нефтепродуктов, от скорости обдува свободной поверхности резервуара, уровня нефтепродуктов в резервуаре, от концентрации окислителя в атмосфере. Вместе с тем до сих пор не были получены аналитические соотношения для оперативной оценки температуры в зоне горения, температуры свободной поверхности нефтепродукта в резервуаре, относительной высоты факела.

Во второй главе приведены методика и результаты экспериментальных исследований горизонтальных резервуаров при хранении бензинов и предложена методика определения концентраций углеводородов.

Для оценки потерь бензина от испарений из резервуара от «больших дыханий» выполнялись измерения следующих параметров: температуры окружающего воздуха в тени, газового пространства и бензина в резервуаре; баро-

метрического давления; давления в газовом пространстве резервуара; концентрации паров бензина в паровоздушной смеси (измерение производилось перед заполнением резервуара, в процессе заполнения, в момент выдачи бензина); время начала и конца заполнения резервуара; уровень бензина в резервуаре в начале и конце заполнения; плотность бензина до и после заполнения резервуара.

По результатам обследования горизонтальных резервуаров было выявлено:

1. Фактические испарения при «дыхании» резервуаров составляют 1,06 кг/т (рис. 1), что выше установленных норм (0,3 кг/т в весенне-летний период) в 3 раза. Это приводит к повышению концентрации паров бензина в воздухе и создает пожарную опасность.
2. В среднем 32,8% (рис. 2) от объема «большого дыхания» выбрасывается через неплотности фланцев замерных смотровых люков. При этом пары бензина распространяются непосредственно по поверхности земли, что создает опасность взрыва и нанесения вреда здоровью обслуживающему персоналу.

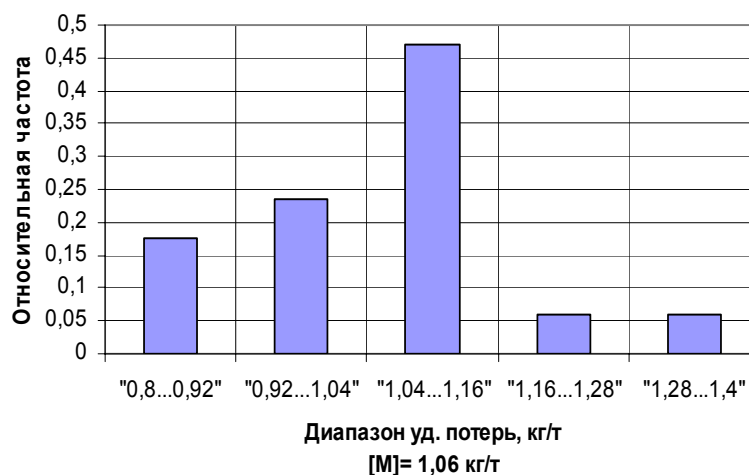


Рис.1. Распределение испарений нефтепродуктов с «дыханием» резервуара

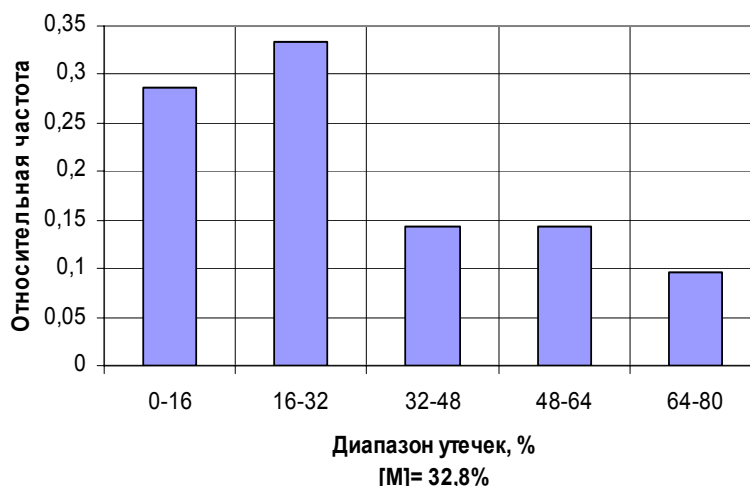


Рис.2. Распределение утечек через неплотности резервуара

- Уровень срабатывания клапанов давления в среднем составляет 52,4 мм водяного столба вместо установленных нормативами 130 мм. Это является следствием отсутствия грузов на тарелках и неплотного прилегания поверхности тарелок к седлу клапана. Имеются значительные загрязнения в камерах клапанов (окалина, засохшая краска). Пониженный уровень срабатывания клапана давления снижает выбросы через неплотности резервуара и ускоряет процесс слива нефтепродуктов из резервуара.

На основе анализа данных эксплуатации было установлено, что основными факторами риска аварий горизонтальных резервуаров являются выбросы паров нефтепродуктов на эстакадах налива, превышение норм испарений при «дыхании» резервуара; негерметичность клапанов.

На основе анализа аварийности на объектах с близкими объемами хранения и имеющих сходное оборудование были определены следующие типичные последствия аварий (в порядке убывания вероятности): пожары и взрывы в резервуарах; горение паров бензина в открытом пространстве при высоких температурах воздуха; «огненные шары» при пожаре на автомобильных цистернах с бензином. По величине вероятных зон действия поражающих факторов на персонал объекта и оборудование *наиболее опасными сценариями* являются

следующие: взрыв паров бензина в воздухе; попадание автоцистерны с бензином в открытое пламя и образование «огненного шара».

Во второй главе приводятся результаты обзора аварийности резервуаров товарных парков с отрывом крыши и последующим пожаром. Полученная статистика свидетельствует о необходимости дальнейшего развития методов теории горения, позволяющих повысить достоверность оценки развития сценария аварийной ситуации.

Третья глава посвящена анализу теоретических основ стационарного горения нефтепродуктов со свободной поверхностью резервуара и разработке расчетной модели, которая может быть применена к решению задач, связанных с прогнозированием сценариев развития пожаров на аварийном резервуаре.

При нагреве и испарении нефтепродуктов со свободной поверхностью формируется конвективная струя, в которой происходит смешение и химическое реагирование паров нефтепродуктов с содержащимся в окружающей среде окислителем. При горении выделяется теплота, которая посредством теплопроводности, конвекции и излучения передается от пламени к нефтепродуктам, стенкам резервуара, а также затрачивается на нагрев продуктов сгорания. Теплота, которую нефтепродукты получают от пламени, затрачивается на ее нагрев и испарение, чем обеспечивается непрерывность процесса горения.

Размеры факела зависят от интенсивности испарения и условий образования горючей смеси. Важнейшей характеристикой рассматриваемого процесса является скорость горения u_2 , под которой понимают объем нефтепродуктов, испаряющийся с единицы поверхности в единицу времени. Численно объемная скорость горения равна линейной скорости понижения уровня нефтепродуктов в резервуаре. Скорость горения нефтепродуктов зависит от диаметра резервуара d . При ламинарном горении увеличение диаметра приводит к уменьшению скорости горения. Это объясняется тем, что с увеличением диаметра резервуара растет высота факела l_{ϕ} (рис.3).

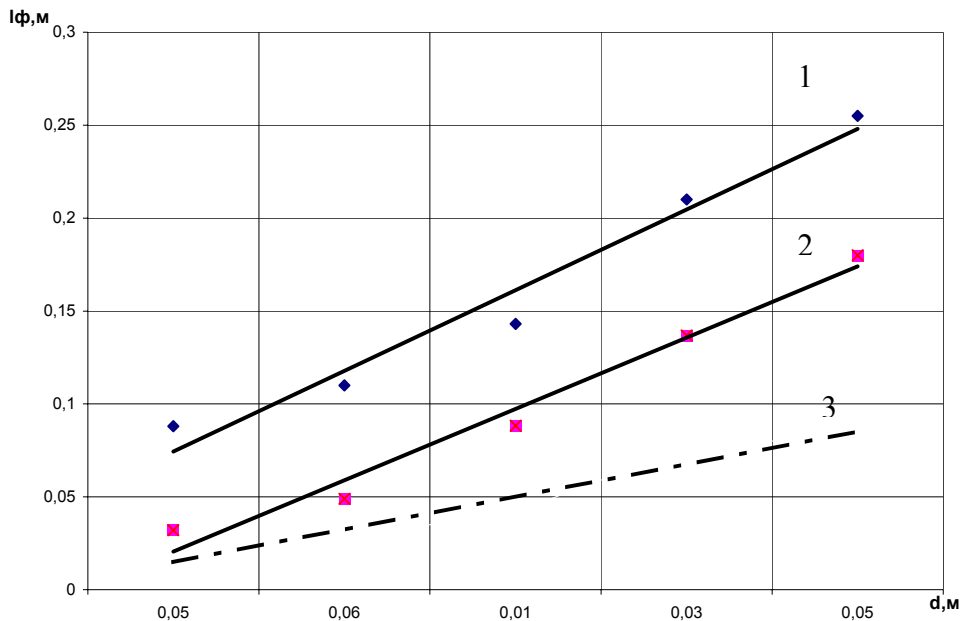


Рис. 3. Зависимость высоты факела от диаметра резервуара; опытные данные и их линейная аппроксимация: 1 – бензин; 2 – дизельное топливо; 3 – расчет для гексана

На рис.3 дано сопоставление расчетных и экспериментальных данных по высоте пламени. Видно, что расчетная величина относительной высоты факела ξ_ϕ примерно в 3,2 раза меньше высоты пламени, определенной по линейной аппроксимации экспериментальных данных. Такое несоответствие объясняется тем, что в принятой модельной постановке величина ξ_ϕ является координатой условного фронта горения, расположенного между поверхностью нефтепродуктов и вершиной реального пламени. Введение корреляционного коэффициента $K=3,2$ позволяет по расчетным значениям ξ_ϕ определить высоту реального пламени при любых значениях диаметра резервуара, отвечающих ламинарному режиму горения.

В третьей главе исследуется процесс горения нефтепродуктов, толщина слоя которых существенно больше, чем толщина зоны прогрева. Первое приближение было ограничено решением системы, включающей уравнения диффузии для газовой фазы и теплопроводности для нефтепродуктов, так как в

этом случае распределение температуры находится из условия подобия полей.

Из условий баланса (материального и теплового) на свободной поверхности и фронте пламени, а также из уравнения Клайперона–Клаузиса разработана математическая модель, которая привела к решению системы трансцендентных уравнений для определения температуры горения (факела) T_ϕ ; температуры свободной поверхности \bar{T}_0 ; относительной высоты факела $\bar{\xi}_\phi$ и скорости горения \bar{u}_2 с учетом параметра $\beta = c_{b0} \cdot \bar{\Omega}$, зависящего от температуры свободной поверхности:

$$\begin{aligned}\bar{T}_0 &= \frac{\vartheta - \vartheta_n + \bar{\Omega} + \omega}{1 + \bar{\Omega}} \left[1 - \beta \frac{\vartheta / \bar{\Omega} + \vartheta_n + 1 - \omega}{\vartheta - \vartheta_n + \bar{\Omega} + \omega} \right], \\ \beta &= \bar{\Omega} \exp \left[n \cdot \vartheta_n \left(\frac{1}{T_k} - \frac{1}{T_0} \right) \right], \\ \bar{T}_\phi &= \frac{\vartheta - \vartheta_n + \bar{\Omega} + \omega}{1 + \bar{\Omega}}, \\ \bar{\xi}_\phi &= \gamma \left(\frac{\bar{\Omega} + 1}{\bar{\Omega} - \beta} \right)^{1/2} \cdot \ln(1 + \beta), \\ \bar{u}_2 &= \rho_{12} \frac{1 + \beta}{\sqrt{(\bar{\Omega} - \beta)(\bar{\Omega} + 1)}},\end{aligned}\tag{1}$$

где $\vartheta = \frac{q}{c_{p1} \cdot T_1^*}$, $\vartheta_n = \frac{q_n}{c_{p1} \cdot T_1^*}$ - безразмерные температуры газа и пара;

$\bar{\Omega}$ - стехиометрическое число;

$\omega = T_{2'} / T_1^*$; $T_{2'}$, $T_{1'}$ - температуры жидкости и газа в невозмущенном состоянии;

γ - изобарный коэффициент расширения;

$\rho_{12} = \rho_1 / \rho_2$, ρ_1, ρ_2 - плотности жидкости и газа;

c_{b0} - концентрация пара на поверхности жидкости;

T_k - температура кипения нефтепродуктов.

В зависимости от способа определения коэффициента поперечного переноса α_c параметры γ и c_m , используемые в формулах для \bar{u}_2 и $\bar{\xi}_\phi$, принимают различные значения. Отличаются и соответствующие решения системы. Сравнение расчетных зависимостей показывает, что определение коэффициента α_c , основанное на непосредственной оценке диффузионного переноса вещества в поперечном направлении, дает значения скорости горения жидкости и высоты

факела, более близкие к экспериментальным данным, чем определяемые по существующим методикам. Уменьшение ошибки составило 30%.

Существенное влияние на процесс горения нефтепродуктов оказывает обдув свободной поверхности параллельным ей потоком воздуха. При этом вблизи границы раздела фаз формируется пограничный слой, внутри которого происходит нагрев и испарение нефтепродукта, смешение и горение паров нефтепродуктов и воздуха.

В случае, когда факел над свободной поверхностью подвергается одностороннему воздействию потока воздуха, направляемого вдоль поверхности нефтепродукта, форма реального факела теряет симметрию, а структура модельного факела претерпевает количественные изменения, связанные с изменением значений коэффициентов переноса теплоты. При этом поперечные тепло- и массоперенос определяются совместным действием диффузионного, кондуктивного и конвективного механизма.

Для определения коэффициентов переноса выделим в цилиндрическом пространстве модельного факела слой высотой d_ξ и диаметром основания d . Утечку паров через боковую поверхность слоя посредством диффузии и конвекции можно оценить выражением

$$\rho_1 D \frac{c_b}{d/2} \pi d \cdot d_\xi + \varepsilon \rho_1 \cdot V \cdot d \cdot d_\xi \cdot c_b, \quad (2)$$

где V – скорость обдува; $\varepsilon = 0,1$ – эмпирический коэффициент, учитывающий уменьшение интенсивности поперечного переноса вследствие сноса в продольном направлении; D – коэффициент диффузии; c_b - концентрация пара.

Тогда суммарная интенсивность переноса паров, отнесенная к единице объема, будет равна

$$G_b = (8\rho_1 D / d^2 + 4\varepsilon\rho_1 \cdot V / d\pi) c_b = \alpha_{cb} \cdot c_b, \quad (3)$$

откуда коэффициент поперечного теплопереноса

$$\alpha_{cb} = 4\rho_1 (2D / d + \varepsilon \cdot V / 4\pi) / d. \quad (4)$$

Подстановка полученных коэффициентов переноса в систему уравнений (1) позволяет в аналитическом виде получить ограничения функции, определяющие скорость горения, высоту факела и другие характеристики переноса.

На основе теоретических исследований и результатов эксперимента было установлено, что увеличение скорости обдува приводит к уменьшению высоты факела. Эффект увеличения скорости горения при обдуве воздухом объясняется интенсификацией испарения нефтепродуктов вследствие его дополнительного нагрева за счет прижатия пламени к свободной поверхности резервуара.

Переход от ламинарного горения к турбулентному характеризуется увеличением количества сажи, выделяющейся при горении. Соответственно увеличивается степень черноты пламени и плотность теплового потока от зоны горения к нефтепродуктам. Это приводит к некоторому увеличению скорости горения. Увеличение диаметра резервуара практически не влияет на величину скорости горения. Полученные формулы показывают, что при горении в турбулентном режиме относительная высота факела не зависит от диаметра резервуара, а скорость горения возрастает с увеличением диаметра. Подбором соответствующего значения эмпирической константы $k_0 = 1,27 \cdot 10^{-3}$ этот результат приводится в соответствие с опытными данными (рис. 4).

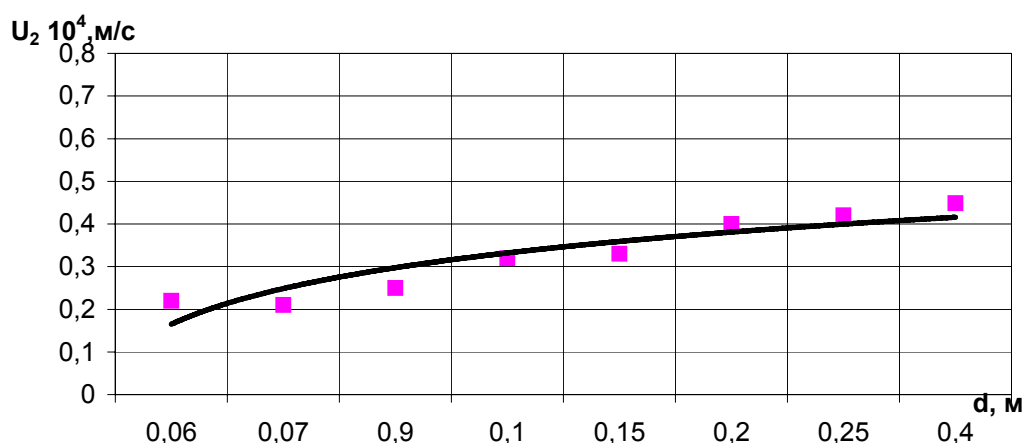


Рис. 4. Зависимость скорости выгорания нефтепродуктов от диаметра резервуара при турбулентном горении: точки обозначают данные эксперимента; линия – расчет

Четвертая глава посвящена изучению процессов затухания горения со свободной поверхностью резервуара посредством введения в резервуар теплопроводной подложки, когда толщина слоя нефтепродуктов соизмерима с толщиной зоны прогрева нефтепродукта. Произведен расчет процесса в двух случаях – когда температура кипения активной жидкости меньше температуры кипения подложки и когда температура кипения жидкости больше температуры кипения подложки.

Горение слоя жидкости конечной толщины отличает ряд особенностей, обусловленных перемещением свободной поверхности к подложке и связанного с этим изменения температурных полей в жидкой и газообразной фазах. Оценки показывают, что в условиях, типичных для горения нефтепродуктов ($\rho_1 \sim 1 \text{ кг/м}^3$, $\rho_2 \sim 10^3 \text{ кг/м}^3$, $a_1 \sim 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$, $a_2 \sim 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$), характерное время протекания процесса в газовой фазе намного меньше характерного времени протекания процесса в жидкости $\frac{\tau_1}{\tau_2} = \frac{a_1}{a_2} \left(\frac{\rho_1}{\rho_2} \right) \ll 1$. Температурное поле нефтепродуктов существенным образом зависит от интенсивности теплоотвода в подложку, т.е. от ее теплопроводности, агрегатного состояния и др.

При горении нефтепродуктов, покоящихся на слое инертной жидкости, температура кипения которой выше температуры кипения реагирующей жидкости, характер процесса сохраняется таким же, как при горении полубесконечного слоя. В том и другом случае непрерывность процесса обеспечивается прогревом нефтепродуктов и испарением их со свободной поверхности. Теплоотвод в подложку приводит к некоторому изменению характеристик процесса (например, уменьшению скорости горения), не изменяя общего характера явления.

Ситуация качественно изменяется, если подложкой является легкокипящая жидкость. В этом случае, когда температура кипения легкокипящей жидкости больше температуры кипения подложки ($T_{к2} > T_{к3}$), на некотором удалении от границы раздела реагирующей и инертной жидкости располагается изо-

термическая поверхность $T_3 = T_{к3}$ (температура подложки равна температуре кипения подложки), ограничивающая область перегретой жидкости. Образующиеся здесь пузыри всплывают под действием архимедовых сил и проникают в слой реагирующей жидкости. Это обстоятельство резко интенсифицирует процессы тепло- и массопереноса в слое, изменяет температуры свободной поверхности резервуара и фронта пламени и, в конечном счете, скорость горения.

Полученные в четвертой главе зависимости представлены на рис. 5. Видно, что увеличение коэффициента теплопроводности подложки λ_3 ведет к падению скорости горения и уменьшению высоты факела. Это объясняется тем, что более высокому значению коэффициента теплопроводности λ_3 соответствует больший теплоотвод от слоя горячей жидкости в подложку, что приводит к охлаждению жидкости, уменьшению температуры поверхности T_0 и скорости горения u_2 .

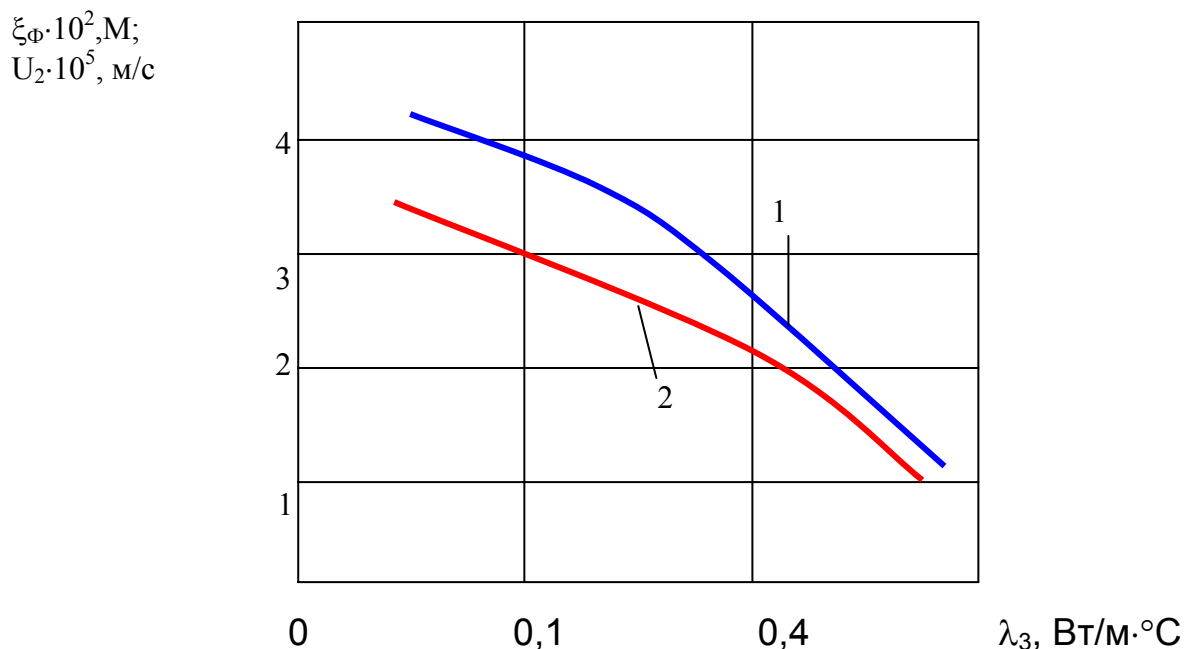


Рис. 5. Зависимость характеристик процесса от коэффициента теплопроводности подложки:
1 – скорость горения; 2 – координата фронта пламени

На рис. 6 представлена расчетная зависимость скорости горения от толщины слоя активной жидкости. Видно, что характер зависимости определяется соотношением коэффициентов теплопроводности активной жидкости к подложке. При $\lambda_3 > \lambda_2$ (подложка более теплопроводна, чем активная жидкость) меньшим значениям толщины слоя δ соответствуют меньшие значения скорости горения. И в случае $\lambda_3 < \lambda_2$ с уменьшением δ скорость горения увеличивается. Наконец, случай $\lambda_3 = \lambda_2$ отвечает горению полубесконечного слоя жидкости. Здесь скорость горения u_2 не зависит от толщины слоя жидкости.

В случае рассмотрения слоя нефтепродукта, покоящегося на поверхности воды (горение на кипящей подложке), наибольший интерес представляет выяснение зависимости характеристик процесса, и в первую очередь, скорости горения u_2 от температуры кипения подложки T_{K3} и толщины слоя горячей жидкости δ . Полученные результаты расчета зависимости $u_2(T_{K3})$ представляют собой монотонно убывающую функцию. Такой характер зависимости объясняется тем, что чем меньше температура кипения подложки T_{K3} , тем сильнее протекает процесс кипения, выше объемное паросодержание m и концентрация пара у свободной поверхности жидкости, что в конечном счете интенсифицирует процесс горения.

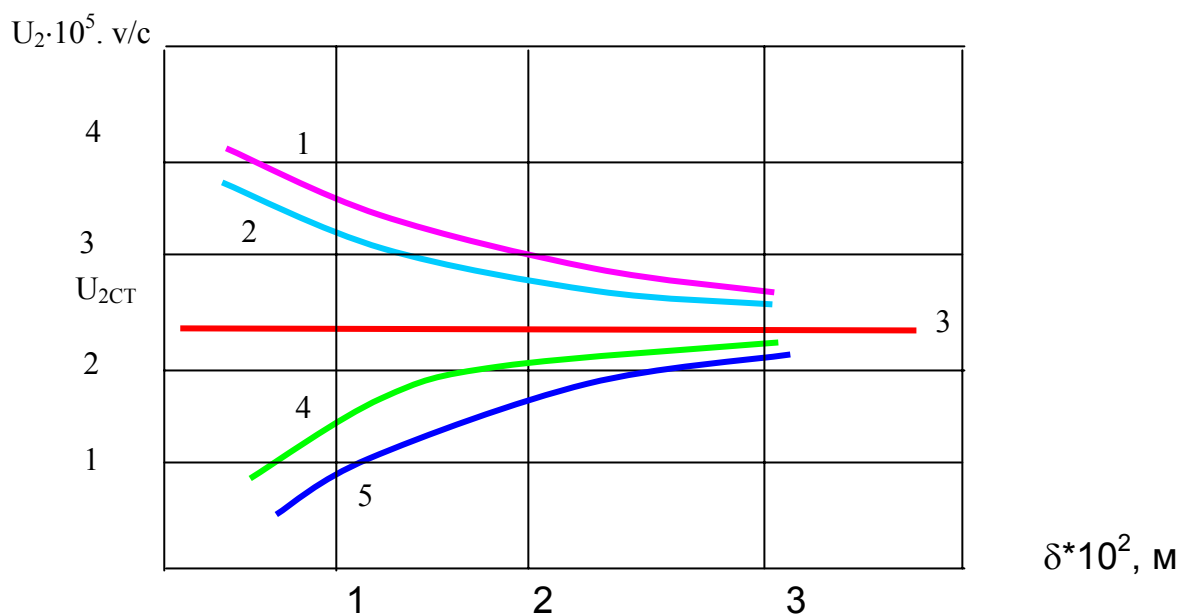


Рис. 6. Зависимость скорости горения от толщины слоя нефтепродуктов:

- 1 - $\lambda_3 = 0,13$ Вт/м·град.
- 2 - $\lambda_3 = 0,135$ Вт/м·град
- 3 - $\lambda_3 = \lambda_2 = 0,14$ Вт/м·град
- 4 - $\lambda_3 = 0,16$ Вт/м·град
- 5 - $\lambda_3 = 0,2$ Вт/м·град

$U_{2СТ}$ – скорость горения полубесконечного слоя.

Что касается зависимости $u_2(\delta)$, то здесь характерным является следующее обстоятельство: меньшим значениям δ (толщине слоя жидкости) соответствуют большие значения скорости горения. В случае горения на некипящей теплопроводной подложке показано, что уменьшение толщины слоя жидкости приводит к падению скорости горения. Это связано с тем, что кипение подложки играет роль компенсирующего фактора; с одной стороны, с уменьшением δ увеличивается теплоотвод в подложку, что уменьшает скорость горения, но с другой стороны, кипение интенсифицирует процесс горения, что, очевидно, связано с увеличением скорости горения.

Эффекты, обусловленные нестационарностью процесса горения конечного слоя жидкости, проявляются тем заметнее, чем меньше величина отношения толщины слоя жидкости δ к толщине зоны прогрева. Это обстоятельство определяет необходимость учета нестационарных явлений при рассмотрении заключительной стадии выгорания толстых слоев жидкости, а также горения жидких пленок.

При горении слоя конечной толщины температура фронта пламени, а также температура свободной поверхности и концентрация пара на ней монотонно уменьшаются. Наиболее сильное изменение температуры горения, температуры свободной поверхности резервуара и параметра, зависящего от температуры свободной поверхности, наблюдается на заключительной стадии процесса, когда происходит выгорание тонкого слоя жидкости. Это объясняется значительным ростом теплопотерь при приближении свободной поверхности к поверхности подложки. Существенно, что из-за экспонентциальной зависимости $\beta = f(T_0)$ незначительное снижение температуры свободной поверхности ведет к заметному уменьшению концентрации пара и скорости горения.

Полученные данные по изменению скорости горения показывают, что во всех случаях уменьшение теплоотвода в подложку ведет к затуханию горения по мере выгорания слоя и к сокращению времени горения. Следует отметить, что при допущении бесконечно большой скорости реакции уменьшение T_0, u_2, β не приводит к срыву горения. В действительности при определенных критиче-

ских значениях температуры свободной поверхности и температуры факела скорость реакции снижается столь значительно, что существование стационарного режима становится невозможным.

ВЫВОДЫ

1. По результатам анализа аварийности на резервуарных парках установлено, что наиболее опасным сценарием развития аварийной ситуации является взрыв резервуара с отрывом крыши и последующим воспламенением нефтепродукта (12,3% от общего количества аварии на резервуарах). Потеря основных фондов от аварий на резервуарах составляют 6,6 млн р/год.
2. Проведен анализ теоретических основ стационарного горения нефтепродуктов со свободной поверхностью резервуаров и разработан аналитический метод определения характеристик процесса горения нефтепродуктов, позволяющий повысить достоверность прогнозирования развития пожара на 30%.
3. Получена зависимость основных характеристик процесса горения от конструктивных и технологических параметров резервуаров. Установлено, что увеличение диаметра резервуара на 0,2 м приводит к уменьшению скорости горения в 2,5 раза и к увеличению высоты факела в 1,2 раза.
4. Разработана математическая модель выгорания нефтепродукта на теплопроводной подложке. Показано, что при известной теплопроводности подложки и определенных критических значениях температур свободной поверхности и факела существование стационарного режима горения становится невозможным, что приводит к затуханию процесса горения.

Основные результаты работы опубликованы в следующих научных трудах:

1. Кузнецова С.А., Попова Н.В. Механизм горения жидкостей со свободной поверхностью резервуара для хранения легковоспламеняющихся нефтепродуктов // Проблемы строительного комплекса России: Материалы

VIII Международной научно-технической конференции. –Уфа:Изд-во УГНТУ,2004.- С.15-16.

2. Кузнецова С.А. Параметрический анализ тепло- и массопереноса в газообразной и жидкой фазах // Повышение эффективности теплообменных процессов и систем: Материалы IV Международной научно-технической конференции. – Вологда: Изд-во ВГТУ,2004.- С.123-126.
3. Кузнецова С.А. Защита атмосферы от выбросов углеводородов из резервуаров для хранения нефти и нефтепродуктов // Повышение эффективности теплообменных процессов и систем: Материалы IV Международной научно-технической конференции.–Вологда:Изд-во ВГТУ,2004.- С.235-238.
4. Кузнецова С.А. Улавливание паров углеводородов из резервуаров для хранения нефти и нефтепродуктов, влияющих на экологическую и пожарную опасность // Проблемы строительного комплекса России: Материалы IX Международной научно-технической конференции. –Уфа: Изд-во УГНТУ,2005.- С.183-185.
5. Кузнецова С.А. Горение слоя легкокипящей жидкости (нефтепродуктов) // Проблемы строительного комплекса России: Материалы IX Международной научно-технической конференции. –Уфа: Изд-во УГНТУ,2005.- С.185-187.
6. Кузнецова С.А., Волков В.Н. Оценка аварийности резервуаров (парков) для хранения нефти и нефтепродуктов // Энергосбережение и энергоэффективность: Материалы VII Международной выставки-конгресса. – Томск,2004.- С.25-27.
7. Кузнецова С.А., Волков В.Н. Горение нефтепродуктов при обдуве свободной поверхности резервуара // Энергосбережение и энергоэффективность: Материалы VII Международной выставки-конгресса. –Томск,2004.- С.28-29.

8. Кузнецова С.А. Турбулентное горение нефтепродуктов в резервуарах // Севергеоэкотех 2005: Материалы VI Международной молодежной научно-технической конференции. –Ухта: Изд-во УГТУ, 2005.- С.145-147.
9. Кузнецова С.А. Расчет процесса горения с учетом переноса теплоты излучением // Севергеоэкотех 2005: Материалы VI Международной молодежной научно-технической конференции. –Ухта: Изд-во УГТУ, 2005.- С.148-151.
10. Кузнецова С.А. Расчет горения слоя нефтепродуктов, температура кипения которой превышает температуру кипения подложки на поверхности нефтепродуктов // Севергеоэкотех 2005: Материалы VI Международной молодежной научно-технической конференции. –Ухта: Изд-во УГТУ, 2005.- С.152-155.
11. Кузнецова С.А. Горение слоя легкокипящей жидкости (нефтепродуктов)// Проблемы строительного комплекса России: Материалы IX Международной научно-технической конференции. – Уфа: Изд-во УГНТУ, 2005. – С. 185-187.