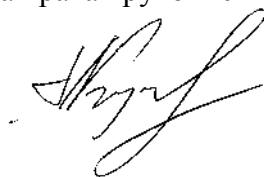


На правах рукописи



КУПЦОВ АДЕЛЬ ИГОРЕВИЧ

**ПРОГНОЗИРОВАНИЕ И ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА
ПОСЛЕДСТВИЙ ВЫБРОСА ГАЗА ЧЕРЕЗ СВЕЧУ
РАССЕИВАНИЯ ПРИ ОПОРОЖНЕНИИ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ**

03.02.08 – «Экология (в химии и нефтехимии)»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Казань – 2016

Работа выполнена на кафедре промышленной безопасности федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Казанский национальный исследовательский технологический университет»

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор
Гимранов Фидаис Мубаракевич

Официальные оппоненты:

Лаптев Анатолий Григорьевич, доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский государственный энергетический университет», заведующий кафедрой технологии воды и топлива

Шагидуллин Артур Рифгатович, кандидат физико-математических наук, государственное бюджетное учреждение Институт проблем экологии и недропользования АН РТ, старший научный сотрудник лаборатории прикладной экологии

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет»

Защита диссертации состоится «28» декабря 2016 года в 16:00 часов на заседании объединенного совета по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук Д 999.097.02 на базе ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет», ФГАОУ ВО «Казанский (Приволжский) федеральный университет» по адресу: 420015, г. Казань, ул. К.Маркса, 68, зал заседаний Ученого Совета (А-330)

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет» и на сайте www.kstu.ru.

Автореферат диссертации разослан «__» _____ 2016 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
Д 999.097.02



Степанова
Светлана
Владимировна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Технологическая операция вынужденного освобождения аппаратов, емкостного оборудования и трубопроводов на химических и нефтехимических производствах осуществляется, в том числе, путем выброса газов через свечи рассеивания непосредственно в атмосферу. Действующими нормативными документами установлено, что плотность среды, выбрасываемой через свечу должна быть не более 0,8 по отношению к плотности воздуха, и, считается, что из-за малой плотности выбрасываемые газы легко и безопасно рассеиваются. Наиболее часто через свечи рассеивания выбрасывают: природный газ, метан, аммиак, водород, ацетилен, этилен и их смеси.

Однако, согласно статистическим и экспериментальным данным, существует реальная вероятность того, что образуемое после выброса газоздушное облако, с концентрациями, превышающими предельно допустимые, может достигнуть мест постоянного пребывания людей, расположения технологических установок или других промышленных объектов.

В настоящее время нормативные методики для оценки распространения вредных и опасных газов при выбросах со свечи, не достаточно корректно описывают реальную физику этих процессов и дальнейшего распространения газа. Для устранения данных недостатков актуально использовать численное моделирование, которое обладает рядом преимуществ, поскольку позволяет проводить как стационарные, так и нестационарные расчеты процессов распространения и рассеивания газов под действием ветра, молекулярной и турбулентной диффузии, с учетом влияния топографических особенностей местности и наличия застройки, шероховатости подстилающей поверхности, плотности и состава газов, тепло- и массообмена, а также различных вариантов устойчивости атмосферы и эффекта дросселирования. Однако для реализации моделирования требуется создание математической модели, адекватно описывающей возникновение и турбулентное поведение газоздушного облака в случае вынужденного выброса опасного газа со свечи рассеивания.

Кроме того, в случаях, когда требуется принятие экстренных решений о возможности выброса опасных газов, продолжительность численного расчета не приемлема. Следовательно, разработка, удобного на практике, экспресс-метода прогнозирования распространения опасного газа позволит решить актуальную задачу безотлагательной экологической оценки последствий вынужденного выброса опасного газа через свечи рассеивания при опорожнении технологического оборудования.

Целью работы являлась разработка математических расчетных методов прогнозирования и экологической оценки последствий вынужденных выбросов газов через свечи рассеивания при опорожнении технологического оборудования на химических и нефтехимических производствах.

Задачи исследования:

1. Анализ особенностей процессов опорожнения технологического оборудования через свечи рассеивания и последующего распространения опасных газов в окружающей среде.

2. Модификация математической модели возникновения и турбулентного поведения газовоздушного облака в случае выброса со свечи, которая позволяла бы учитывать нестационарность процесса опорожнения, устойчивость атмосферы, рельеф местности, наличие промышленной застройки и эффекта дросселирования.

3. Проведение сравнительного анализа данных экспериментов и натурных исследований с результатами расчетов по предложенной модели в целях ее последующей верификации.

4. Оценка влияния конструктивных характеристик свеч и технологических режимных параметров выброса газа на пространственно-временные закономерности распространения и рассеивания опасных газов в атмосферном воздухе.

5. Разработка и практическая реализация рекомендаций по проектированию и эксплуатации технологических свеч, обеспечивающих безопасный выброс газов на химических и нефтехимических производствах.

6. Разработка экспресс-метода прогнозирования пространственно-временного распространения опасного газа для определения безопасных расстояний от свечи рассеивания.

Научная новизна:

1. Модифицирована математическая модель для расчета процессов вынужденного выброса газов со свечи и дальнейшего пространственно-временного распространения газовоздушных облаков с учетом нестационарности явлений, особенностей метеоусловий, эффекта дросселирования и рельефа местности.

2. Представлен способ расчета длительности опорожнения технологического оборудования, а также режимных параметров в виде функциональной зависимости от времени, позволяющий определить граничные условия на оголовке свечи.

3. Впервые с использованием методов градиента и профиля, выполнена увязка параметров окружающей среды с предложенной математической моделью, позволяющая использовать показания метеодатчиков в виде UDF-функций.

4. Впервые разработан и использован на практике экспресс-метод для оперативной экологической оценки обстановки при необходимости вынужденного опорожнения технологического оборудования через свечи рассеивания.

Практическая значимость работы состоит в том, что выполненные в диссертационной работе исследования процессов распространения газовоздушных облаков, образующихся при выбросах опасного газа из технологического оборудования через свечи, позволяют обосновать выбор их места расположения на промышленной площадке, определить их конструктивные размеры, установить длительность опорожнения технологического оборудования, учесть метеоусловия атмосферного воздуха, а также эффект дросселирования, рельеф местности и наличие промышленной

застройки. Использование результатов работы существенно упростит проектирование и приведет к экологически безопасной эксплуатации свеч рассеивания.

Модифицированная модель и предложенный экспресс-метод в виде номограмм использовались при проведении оценки последствий выброса попутного нефтяного газа, содержащего примеси сероводорода, через свечу рассеивания при опорожнении оборудования НГДУ «Нурлатнефть» ПАО «Татнефть»; а также при разработке планов мероприятий по локализации и ликвидации последствий аварий на аммиачно-холодильной установке АО «Йошкар-Олинский мясокомбинат» и документации на консервацию холодильного цеха № 12 ПАО «Казанский завод синтетического каучука».

Методами исследования являлись численные методы решения уравнений, а также экспериментальные методы и методы вычислительной газодинамики.

Положения, выносимые на защиту:

1. Математическая модель образования и турбулентного поведения газозащитного облака при вынужденных выбросах со свечи на объектах химических, нефтегазоперерабатывающих производств, позволяющая учитывать нестационарность процесса опорожнения, устойчивость атмосферы, рельеф местности, наличие промышленной застройки и эффекта дросселирования.

2. Способ увязки параметров атмосферного пограничного слоя для оперативного численного моделирования распространения опасного газа. Разработка UDF-функций с целью адаптации модели к реальным метеорологическим условиям.

3. Определение длительности опорожнения технологического оборудования с последующим получением сопряженных граничных начальных условий на оголовке свечи, необходимых для численного моделирования выброса газа.

4. Экспресс-метод прогнозирования распространения опасного газа для проектирования и безопасной эксплуатации свечи рассеивания на химических и нефтехимических производствах.

Достоверность полученных результатов подтверждается удовлетворительной согласованностью вычислений и теоретических результатов с собственными экспериментальными данными, теоретическими и экспериментальными данными других авторов, с последствиями происшедших техногенных аварий.

Личный вклад автора состоит в модификации математической модели, в реализации методов решения и алгоритмов расчета, в проведении экспериментальных исследований, непосредственном участии в получении, анализе и обобщении результатов и формировании научных выводов, а также в написании научных работ по теме диссертации.

Апробация работы.

Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на III Межрегиональной научно-практической конференции «Промышленная экология и безопасность» (г. Казань, сентябрь 2013 г.); на VI Международной научно-практической конференции молодых ученых

«Актуальные проблемы науки и техники-2013» (г. Уфа, 20-22 ноября 2013 г.); на III Международной научно-практической конференции «Современные проблемы безопасности жизнедеятельности: настоящее и будущее» (г. Казань, февраль 2014 г.); на IX Международной научно-практической конференции «Фундаментальные и прикладные исследования в современном мире» (г. Санкт-Петербург, 11 марта 2015 г.); на I Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы безопасности жизнедеятельности и экологии» (г. Тверь, ТГТУ, 25-26 марта 2015 г.); на II International Scientific and Practical Conference «WORLD SCIENCE» (Dubai, UAE, October 20-21th, 2015); на VII International Scientific and Practical Conference «International Scientific Review of the Problems and Prospects of Modern Science and Education (London, UK, 7-8th November, 2015); на VI International Scientific Conference «Global Science and Innovation» (Chicago, USA November 18-19th, 2015); на научно-практической конференции по актуальным вопросам переработки попутного нефтяного и природного газа, посвященная 60-летию МГПЗ управления «Татнефтегаз-переработка» ПАО «Татнефть» (г. Альметьевск, МГПЗ, 15 апреля 2016 г.); на Международной научно-практической конференции «Теоретические и прикладные вопросы науки и образования» (г. Тамбов, 30 июля 2016 г.); на ежегодных научно-технических семинарах ФГБОУ ВО «КНИТУ» (2013 – 2016 гг.).

Публикации результатов работы.

По материалам диссертационной работы опубликованы 10 работ в рецензируемых научных журналах и изданиях, рекомендованных ВАК (в том числе 2 работы, в изданиях, индексируемых в международной научной базе данных Scopus), 10 материалов и докладов на семинарах и конференциях.

Объем и структура работы.

Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения, списка сокращенных и условных обозначений, списка литературы и приложения. Работа изложена на 165 страницах машинописного текста и включает 16 таблиц и 41 рисунок.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении диссертации приведен анализ последствий вынужденных выбросов газов через свечи рассеивания при опорожнении технологического оборудования на химических и нефтехимических производствах. Описываются случаи, когда даже легкий газ, выбрасываемый со свечи, не рассеивался, а распространялся в приземном слое, что влекло за собой крупные аварии и экологическое загрязнение окружающей среды. Рассмотрена проблема оперативного и расчетного подтверждения подобного явления, а также поставлены цели и задачи исследования, обоснована актуальность работы.

В первой главе выявлены основные факторы, существенно влияющие на выбросы опасных газов и паров через технологические свечи и на процесс рассеивания опасного парогазовоздушного облака в приземном слое, такие как: метеоусловия; физико-химические свойства выбрасываемого газа; высота выброса; топографические факторы местности; продолжительность процессов опорожнения и т.д. Установлено, что для адекватного моделирования процессов

распространения опасного газа в окружающей среде целесообразно учитывать уравнения баланса кинетической энергии турбулентности, движения атмосферного воздуха и теории Монина-Обухова.

Приведен литературный обзор по существующим нормативным моделям и методикам, предназначенных для расчета распространения и рассеивания газов в атмосфере. В результате анализа обнаружено, что большинство из них базируются на приближенных формулах и зависимостях, и, практически, все они имеют ограничения по учету следующих важных факторов: нестационарности процесса выброса, классов атмосферной устойчивости, рельефа местности, застройки, эффекта дросселирования, оказывающих значительное влияние на распространение и рассеивание опасного газа. Сравнение полученных экспериментальных данных с расчетами по нормативным методикам показало их ограниченную применимость для расчетов залповых выбросов со свечи.

Приведена обоснованность выбора численного моделирования для решения экологических задач, связанных с вынужденным выбросом опасного газа в атмосферу. Программные пакеты, основанные на численном моделировании, позволяют проводить как в стационарном, так и в нестационарном режиме физико-математическое моделирование процессов распространения и рассеивания газов под действием скорости ветра, молекулярной и турбулентной диффузии, топографических особенностей местности и наличия застройки, шероховатости подстилающей поверхности, плотности и состава газов, тепло- и массообмена, конденсации, а также различных вариантов устойчивости атмосферы.

Во второй главе диссертации предложена модель для описания турбулентного распространения газа в атмосферном воздухе. Математическая модель включает в себя систему фундаментальных уравнений сохранения и замыкается с помощью стандартной к-ε модели турбулентности. Модель интегрирована в программный пакет вычислительной газодинамики Fluent. Система фундаментальных уравнений имеет следующий вид:

уравнение неразрывности:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0; \quad (1)$$

уравнение переноса импульса:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = \\ - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) \right] - \frac{\partial(\overline{\rho u'_i u'_j})}{\partial x_j} + \rho g_i; \end{aligned} \quad (2)$$

уравнения переноса энергии и газа:

$$\frac{\partial(\rho h)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i h)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\lambda + c_p \frac{\mu_t}{Pr_t} \right) \frac{\partial T}{\partial x_i}; \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\rho Y_s)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i Y_s)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\rho D + \frac{\mu_t}{Sc_t} \right) \frac{\partial Y_s}{\partial x_i} \right] + S_c ; \quad (4)$$

В этих уравнениях $p = \rho RT$; $h = C_p T$; Sc_t - турбулентное число Шмидта = 0.7, а выражение для турбулентной вязкости μ_t принимает вид (формула Колмогорова-Прандтля):

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} . \quad (5)$$

Так как система фундаментальных уравнений (1-5), описывающая во времени изменения поля скорости и скалярных полей, не может быть решена за приемлемый промежуток времени с помощью современных вычислительных средств, то в настоящее время экономически оправданно используют уравнения Навье-Стокса, осредненные по Рейнольдсу. В основу осреднения приняты различные модели турбулентности, в том числе и, используемая нами, k - ε standard. Для определения параметров k и ε решаются уравнения переноса:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \text{div}(\rho k \vec{U}) = \text{div} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \text{grad } k \right] + 2\mu_t E_{ij} E_{ij} + G_b - \rho \varepsilon + S_k ; \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \text{div}(\rho \varepsilon \vec{U}) = \text{div} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \text{grad } \varepsilon \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (2\mu_t E_{ij} E_{ij} + C_{3\varepsilon} G_b) - \\ - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon . \end{aligned} \quad (7)$$

Предложено, путем частичного преобразования стандартных констант турбулентности и источникового члена S_k в k -уравнении (6), модифицировать стандартную k - ε модель турбулентности, для учета генерации турбулентности силами плавучести, сохранения входных граничных профилей (профиля скорости, температуры и турбулентных характеристик от масштаба длины Мони́на-Обухова) на протяжении всей расчетной области, и, в конечном итоге, адекватного моделирования пограничного слоя атмосферы.

Модификация стандартной k - ε модели заключается в использовании отличных от стандартного ряда констант турбулентности:

$$C_\mu = 0.0333; \sigma_k = 1.00; \sigma_\varepsilon = 1.3; C_{1\varepsilon} = 1.176; C_{2\varepsilon} = 1.92 , \quad (8)$$

и, модифицированного нами, источникового члена S_k :

$$S_k = -\beta g_i^2 \frac{\mu_t}{C_p \text{Pr}_t} ; \quad (9)$$

Результаты дальнейших расчетов показали, что коэффициенты турбулентной диффузии, полученные при использовании модифицируемого источника в k - ε standard модели, хорошо согласуются с коэффициентами турбулентной диффузии, полученными по данным Мони́на и Обухова.

Для увязки граничных условий в расчетной области с измерениями метеодатчиков, предложено поэтапное использование методов градиента и профиля, а также разработаны пользовательские функции (UDF). В ходе расчетов по методам градиента и профиля определяются параметры атмосферного пограничного слоя, которые ранее, в основном, задавались через приблизительные значения интенсивности и масштаба турбулентности. К параметрам относятся: масштаб длины Монино-Обухова, динамическая скорость, шероховатость, масштаб температуры, температура поверхности земли, средняя плотность воздуха и тепловой поток земли. Значения вышеперечисленных параметров позволяют задавать граничные условия расчетной области в виде функций.

Поэтапное использование методов градиента и профиля позволяет провести расчеты профиля коэффициента турбулентной диффузии, базирующихся исключительно на использовании замеров метеоданных на местности.

В третьей главе аналитически решена задача вынужденного освобождения технологического оборудования через свечи. Установлена функциональная зависимость изменения давления, скорости и массового расхода от времени на выходном сечении свечи. Полученные зависимости являются граничными (начальными) условиями для расчета пространственно-временного рассеивания опасных газов в атмосферном воздухе.

Решение состоит из последовательных этапов:

- определение длительности опорожнения;
- определение сопряженных граничных начальных условий на оголовке свечи для последующего моделирования распространения и рассеивания взрывоопасного газа в окружающей среде.

Критическая скорость истечения газа на выходе из свечи примерно равна местной скорости звука и может быть представлена в виде:

$$w_t = w_{кр} = \varphi \sqrt{\frac{2k}{k+1} \frac{P_1}{\rho_1}} = \varphi \sqrt{\frac{2k}{k+1} \frac{RT_1}{\mu}} = \varphi \sqrt{2 \frac{C_p T_1}{\mu} \frac{k-1}{k+1}}, \quad (10)$$

где φ – коэффициент гидравлического сопротивления; для идеального газа (при отсутствии потерь) $\varphi = 1$; для реального газа $\varphi = 0,8 \div 0,9$; k – показатель адиабаты; P_1 – давление газа в оборудовании, Па; ρ_1 – плотность газа в оборудовании, кг/м³; R – универсальная газовая постоянная, Дж/(моль К); μ – молярная масса газа, кг/моль; T_1 – температура газа в оборудовании, К; C_p – молярная теплоемкость при постоянном давлении.

Выброс газа через свечу, так или иначе, связан с изменением исходного состояния среды в опорожняемом оборудовании вследствие убывания газа. Исходя из особенностей численного моделирования выброса газа через свечу, рассматриваются два варианта:

1 вариант. Убывание массы газа в оборудовании в процессе выброса.

Полное время опорожнения массы газа τ_m определяется из соотношения:

$$\frac{1}{\tau_m} = \left(\frac{1}{m} \left| \frac{dm}{dt} \right| \right)_{t=0} = \frac{1}{V} (\beta)^{1/k} \varphi \sqrt{2 \frac{C_P T_1}{\mu} \left[1 - \beta^{\frac{k-1}{k}} \right]} s. \quad (11)$$

где m – общая масса газа в оборудовании, кг; V – объем газа в оборудовании, м³; s – площадь поперечного сечения свечи выброса, м²; β – отношение давлений в атмосфере P_2 и в оборудовании P_1 ; $\beta = P_2/P_1$

2 вариант. Понижение давления газа в оборудовании в процессе выброса.

Оценка времени убыли выброса давления τ_p в оборудовании устанавливается по формуле:

$$\frac{1}{\tau_p} = \left(\frac{1}{P_1} \left| \frac{dP}{dt} \right| \right)_{t=0} = \frac{sw_{\text{бак}}(T_1)}{V} (\beta)^{1/k} \left(\varphi^2 k \left[1 - \beta^{\frac{k-1}{k}} \right] + (\beta)^{\frac{k-1}{k}} \right) \varphi \sqrt{\left[1 - \beta^{\frac{k-1}{k}} \right]}. \quad (12)$$

$$w_{\text{бак}}(T_1) = \sqrt{2 \frac{C_P T_1}{\mu}}$$

где $w_{\text{бак}}(T_1)$ – понятие «скорости истечения газа в вакуум», м/с; C_V – молярная теплоемкость при постоянном объеме.

Пренебрегая скоростью перемещения газа в оборудовании, в сторону свечи, по сравнению с его скоростью в выходном отверстии свечи, параметры газового

потока при соотношении давлений равном $\beta_{\text{кр}} = \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k-1}}$ находятся как:

$$\rho_{\text{кр}} = \rho_1(t) \left(\frac{2}{k+1} \right)^{1/(k-1)}; \quad T_{\text{кр}} = T_1(t) \left(\frac{2}{k+1} \right); \quad (13)$$

$$P_{\text{кр}} = P_1(t) \left(\frac{2}{k+1} \right)^{k/(k-1)} > P_2. \quad (14)$$

Тогда с учетом формул (11-14) получим следующие оценки времени при опорожнении оборудования через критическую скорость, вычисляемые, первая (15) через убыль массы, а вторая (16) – через понижение давления в аппарате:

$$\frac{1}{\tau_m} = \left(\frac{1}{m} \left| \frac{dm}{dt} \right| \right)_{t=0} = \frac{1}{V} \left(\frac{2}{k+1} \right)^{1/(k-1)} \varphi \sqrt{2 \frac{C_P T_1}{\mu} \frac{k-1}{k+1}} s; \quad (15)$$

$$\frac{1}{\tau_p} = \left(\frac{1}{P_1} \left| \frac{dP}{dt} \right| \right)_{t=0} = \frac{sw_{\text{бак}}(T_1)}{V} \left(\frac{2}{k+1} \right)^{1/(k-1)} \left(\frac{\varphi^2 k (k-1) + 2}{k+1} \right) \varphi \sqrt{\frac{k-1}{k+1}}. \quad (16)$$

На основании найденных выражений проведен сравнительный анализ результатов расчета длительности выброса газа, выполненных по обоим вариантам (см. табл. 1).

Разница между временами опорожнения, определяемыми через уменьшение массы газа и сброс давления, инвариантна при изменениях диаметра свечи, температуры в оборудовании и объема последнего. Это свидетельствуют о том,

что принципиального отличия между двумя этими подходами при выборе граничных начальных условий на оголовке свечи нет.

Таблица 1 – Расчетные данные при докритическом и критическом отношении давлений

Газ	P_1 , МПа	ϕ	V_1 , м ³	T_1 , К	Диаметр свечи d , м	τ_m , с	τ_p , с
Ацетилен	0,14/4	0,9/0,9	100/200	293/273	0,3/0,3	8,23/15,82	8,18/15,64
Метан	0,14/4	0,9/0,9	100/200	293/273	0,3/0,3	6,46/12,41	6,42/12,27
Воздух	0,14/4	0,9/0,9	100/200	293/273	0,3/0,3	8,62/16,42	8,51/16,06

Примечание. Над чертой приведены данные для докритического отношения давлений, под чертой – для критического.

В диссертационной работе при численном моделировании выброса опасного газа, исходя из постановки задачи, использовались оба типа граничного начального условия на оголовке свечи: задание функций давления или массового расхода от времени.

Нами на лабораторной установке проведена серия экспериментов с распространением пропана при установившемся расходе его подачи. Затем проводилось сравнение данных экспериментов в контрольной точке с данными численного расчета. Согласно результатам стационарных расчетов с использованием стандартной модели k- ϵ отклонение результатов численного моделирования распространения газа в установке от показаний датчика газоанализатора в виде линий тренда составляет в разных пространственных точках (высотой 0, 105, 180 мм) исследовательской камеры 5-10%.

Оценка достоверности предложенной математической модели, осуществлена на основе сопоставления результатов расчетов по ней с данными экспериментов. Для этих целей использованы данные, полученные в ООО «Газпром Трансгаз Ставрополь». Сопоставление концентраций метана, определенных с применением различных методик и моделей, с экспериментально измеренными концентрациями при срабатывании газа со свечи приведено в таблице 2.

Таблица 2 – Осредненные рассчитанные и экспериментальные данные.

Расстояние, м	Данные по концентрации, мг/м ³				
	ОНД-86 ¹	РБФС ²	PHAST ¹	FLUENT ³	Экспериментальные данные
300	53,5	4,84	3,08	5,52	4,75
520	54	2,86	4,79	4,90	3,25
1000	42	1,51	9,54	9,25	7,26

¹ Расчеты по методике ОНД-86 и модели PHAST велись исследователями, проводившими эксперимент.

² Расчеты по Руководству по безопасности факельных систем.

³ Расчеты проводились по предложенной методике оценки последствий выброса газа через технологические свечи в окружающую среду, с использованием предложенной нами модели турбулентного распространения газа в атмосферном воздухе на программном комплексе FLUENT.

Предложенная математическая модель оценки последствий выброса газа через технологические свечи, с наибольшей точностью описывает процесс рассеивания и распространения опасного газа по сравнению с другими расчетными методиками, и вполне удовлетворительно согласуются с данными экспериментов и натурных испытаний. Это позволяет предложить разработанную модель для прогнозирования последствий выброса газа через свечи.

В четвертой главе на основе численных экспериментов проанализировано влияние устойчивости атмосферы, скорости ветра, конструктивных и режимных параметров свечи на выброс опасного газа со свечи и на его дальнейшее распространение.

Установлено, что на малом расстоянии (до 100 м) от свечи ($h = 10$ м; $d = 0,1$ м) наиболее неблагоприятными метеоусловиями для выброса газа (этилена) под давлением $P_{изб} = 0,1$ МПа является неустойчивая стратификация атмосферы и высокая скорость ветра, а на отдаленном расстоянии – устойчивая (инверсия) и штиль. Сделан вывод о том, что в отличие от низких скоростей при высоких скоростях ветра струя опасного газа не сразу начинает прижиматься при инверсии к земной поверхности, а растягивается по направлению ветра. При инверсии и при малом расстоянии от свечи, в пределах селитебной зоны и рабочих площадок, рекомендован выброс опасного газа при скоростях ветра, превышающих 5 м/с.

Численными расчетами подтверждены факты роста значений концентраций на земной поверхности с увеличением диаметра свечи, с понижением температуры и повышением избыточного давления. Так, например, при $d = 0,2$ м концентрация достигнет значения ПДК на расстоянии 1320 м, а при $d = 0,3$ м на расстоянии 2140 м. Что неприемлемо, так как превышает размеры санитарно-защитных зон даже для предприятий первого класса, равные 1000 м. При изменении температуры выбрасываемого опасного газа на оголовке свечи ($253 \rightarrow 273 \rightarrow 293$ К) на расстоянии в 50 м, значение концентрации, при температуре газа на оголовке 253 К выше, чем при температурах 273 К и 293 К более чем на 30%. А при возрастании давления до $P_{изб} = 1$ МПа концентрация начинает даже превышать значения НКПРП в диапазоне расстояний 220 – 409 м от свечи, то есть возникает взрывоопасная ситуация.

Установлено, что при увеличении высоты свечи лучше обеспечивается безопасное рассеяние опасного газа, однако существует определенная оптимальная техническая высота свечи, начиная с которой не столь эффективно ее увеличение. К примеру, при выбросе этилена под $P_{изб} = 0,1$ МПа концентрация газа на 1,5 км от свечи в случае увеличения ее высоты с 10 до 15 м практически выравнивается.

Представлен алгоритм расчета предельно допустимого выброса (ПДВ) со свечи рассеивания с помощью численного моделирования. Так, в результате численного моделирования стационарного выброса со свечи рассеивания ($h = 5$ м, $d = 0,1$ м), массовый расход этилена которой составлял 28,89 кг/с, в условиях инверсии ($u = 1$ м/с) максимальная концентрация на высоте рабочей зоны в 2 м

составляла 961 мг/м^3 (в 9,6 раз больше ПДК) на расстояние 637,3 м от свечи. На основании этого вычислено значение $\text{ПДВ} = 3006 \text{ г/с}$, при котором концентрации на высоте рабочей зоны не будут превышать ПДК.

В пятой главе рассмотрены нестационарные выбросы опасных газов со свечи. Установлено, что под конец срабатывания природного газа с оборудования, возможно образование «загазованной» зоны в непосредственной близости от свечи. При срабатывании газов с оборудования с незначительным объемом, значения концентраций превышают значения ПДК только в непосредственной близости у свечи. Следовательно, допустимо применение свеч для опорожнения малых емкостей (например, оборудование аммиачной холодильной установки).

Модифицированная модель применена при решении вопроса целесообразности использования свечи для рассеивания попутного нефтяного газа в атмосферу при возможном аварийном опорожнении оборудования НГДУ «Нурлатнефть» ПАО «Татнефть». Превышение или достижение значений ПДК сероводорода (в составе попутного нефтяного газа) у земной поверхности наблюдается уже через 10 метров от свечи и на довольно протяженном расстоянии в 110 м. Учитывая, что сероводород является токсичным веществом остронаправленного воздействия, а также с учетом близкого расположения промышленной площадки к населенному пункту в НГДУ «Нурлатнефть» ОАО «Татнефть» отказались от закупки свечи рассеивания.

Своевременная экологическая оценка масштабов загрязнения элементов окружающей среды и возможных последствий в результате выброса опасного газа представляет собой важную задачу в целях обеспечения безопасности населения и сохранности окружающей природной среды.

Для решения этой задачи разработан экспресс-метод для безотлагательного прогнозирования распространения опасного газа в атмосферном воздухе при его выбросах через свечу рассеивания. В процессе его создания последовательно решены ряд взаимосвязанных подзадач:

1) подбор наиболее характерных и часто встречающихся на практике параметров для последующих расчетов (стратификация атмосферного воздуха и скорость ветра, высота и диаметр свечи, давление и температура опасного газа в оборудовании);

2) численное моделирование выброса опасного газа по предложенной нами математической модели путем перебора всех возможных сценариев с совокупностью всех выбранных параметров (реперных точек);

3) обработка результатов численного моделирования (например, максимальная длина загазованной зоны) в доступной форме для практического использования инженерно-техническим персоналом.

Для специалистов, осуществляющих эксплуатацию свеч на химических и нефтехимических производствах, а также для проектировщиков, наиболее удобной является представление результатов в виде номограмм. Нами разработаны несколько номограмм ромбоидального типа для различных газов (природный газ, аммиак, этилен (рис. 1)).

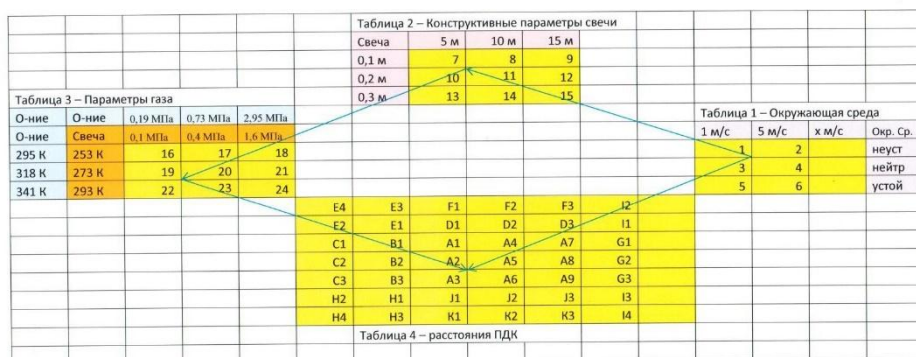


Рисунок 1 – Номограмма по определению последствий выброса этилена через свечу рассеивания

Разработанный экспресс-метод позволяет за кратчайшее время, не прибегая к численному моделированию, определить безопасные расстояния при выбросах опасного газа через свечу рассеивания в зависимости от параметров окружающей среды, от конструктивных параметров свечи и от параметров газа в оборудовании; а также допустимый выброс или конструктивные параметры свечи, или технологические режимные параметры эксплуатации газа в оборудовании.

Заключение

Основные результаты работы заключаются в следующем:

1. Проведен анализ особенностей процессов опорожнения технологического оборудования через свечи рассеивания с последующим распространением опасных газов в окружающей среде.

2. Модифицирована математическая модель возникновения и турбулентного распространения газозоудного облака в случае выброса со свечи, позволяющая учесть нестационарность процесса опорожнения, устойчивость атмосферы, рельеф местности, наличие промышленной застройки и эффект дросселирования.

3. Предложен способ увязки параметров атмосферного пограничного слоя через поэтапное использование методов градиента и профиля для численного моделирования распространения опасного газа. Разработаны UDF-функции, позволяющие адаптировать математическую модель с данными полученными от метеодатчиков.

4. Предложен расчет длительности опорожнения технологического оборудования с последующим получением сопряженных граничных начальных условий на оголовке свечи, необходимых для численного моделирования пространственно-временного распространения опасного газа в окружающей среде.

5. Проведено сравнение экспериментальных и исследовательских данных с выполненными нами расчетами, в результате которого подтверждена достоверность разработанной модифицированной модели и принятых граничных условий.

6. Проведена оценка влияния конструктивных характеристик свеч и технологических режимных параметров выброса газа, а также проанализировано влияние устойчивости атмосферы и скорости ветра на пространственно-временные закономерности распространения и рассеивания опасных газов в атмосферном воздухе. Даны рекомендации по нахождению значения предельного допустимого выброса, при котором не образуются экологически опасные концентрации в приземном слое атмосферы.

7. Разработаны рекомендации по проектированию и эксплуатации технологических свеч, обеспечивающих экологически безопасный выброс газов на химических и нефтехимических производствах.

8. Разработан экспресс-метод прогнозирования распространения опасного газа в виде номограмм для проектирования и экологически безопасной эксплуатации свечи рассеивания на химических и нефтехимических производствах.

Публикации в рецензируемых журналах, рекомендованных к изданию ВАК Минобрнауки РФ

1. Купцов А.И. Экспериментальная установка для имитации процессов распространения облаков газов / А.И. Купцов, Д.Я. Исламхузин, Ф.М. Гимранов // Вестник Казанского технологического университета. – 2013. – №4. – С. 229-232.

2. Купцов А.И. Численное моделирование пограничного слоя атмосферы с учетом ее стратификации / А.И. Купцов, Р.Р. Акберов, Д.Я. Исламхузин, Ф.М. Гимранов // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 9 (Ч.7). – С. 1452-1460.

3. Купцов А.И. Проблемы расчета рассеивания легких газов в атмосфере при их выбросах со свечи с учетом рельефа и застройки местности и атмосферной устойчивости / А.И. Купцов, Р.Р. Акберов, Д.Я. Исламхузин, Ф.М. Гимранов // Вестник Казанского технологического университета – 2014. – № 6. – С. 284-286.

4. Купцов А.И. Расчет длительности опорожнения технологического оборудования через свечи сброса / А.И. Купцов, Р.Р. Акберов, Ф.М. Гимранов // Пожаровзрывобезопасность. – 2015. – №6. – С. 36-41.

5. Купцов А.И. Влияние метеоусловий на динамику рассеивания опасного газа, сбрасываемого через технологические свечи / А.И. Купцов, Р.Р. Акберов, Ф.М. Гимранов // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2015. - №4. – С. 171-177.

6. Купцов А.И. Экологический мониторинг. CFD-технологии. UDF-функции / А.И. Купцов // Вестник технологического университета. – 2015. – №20. – С. 203-207.

7. Kuptsov A.I. Influence of atmospheric stratification on discharge of hazardous gases through a stack to the atmosphere / A.I. Kuptsov, A.G. Zubkov, F.M. Gimranov. — Вестник технологического университета. – 2015. – №23. – С. 129-131.

8. Kuptsov A.I. Calculation of gas parameters at the exit from a gas vent stack by means of calculating duration of emptying of the processing equipment / Adel I. Kuptsov, Roald R. Akberov, Fidais M. Gimranov // Contemporary Engineering Sciences, Vol. 9, 2016, no. 3, P. 103-111.

9. Kuptsov A.I. Developing nomograms using CFD results for predicting propagation of hazardous gases released through vent stacks to the atmosphere / Adel I. Kuptsov, Roald R. Akberov, Fidais M. Gimranov // *Contemporary Engineering Sciences*, Vol. 9, 2016, no. 3, P. 113-124.

10. Купцов А.И. Определение параметров атмосферного пограничного слоя с целью моделирования сброса опасного газа и его последующего распространения в окружающей среде / А.И. Купцов, Р.Р. Акберов, Ф.М. Гимранов, А.Г. Зубков. — *Вестник технологического университета*. – 2016. – №6. – С. 114-119.

Прочие публикации и материалы конференций:

1. Купцов А.И. Численное моделирование сброса газов через свечу рассеивания на газотранспортных и газоперерабатывающих объектах / А.И. Купцов, Ф.М. Гимранов // *Журнал экологии и промышленной безопасности*, 2013. – № 3. – С. 16-17.

2. Купцов А.И. Модель турбулентности при расчете рассеивания газа в условиях городской застройки / А.И. Купцов, Д.Я. Исламхузин, Ф.М. Гимранов // *Сборник трудов VI Международной научно-практической конференции молодых ученых «Актуальные проблемы науки и техники-2013»*. Том II, Уфа, 20-22 ноября 2013, Уфа: Нефтегазовое дело, 2013. – С. 24-25

3. Купцов А.И. Опасность распространения газозоодушного облака в окружающее пространство при сбросе через свечу рассеивания на газоперерабатывающем производстве / А.И. Купцов, Ф.М. Гимранов // *Современные проблемы безопасности жизнедеятельности: настоящее и будущее: материалы III Междунар. научн.-практич. конф. в рамках форума «Безопасность и связь»*. Часть II, Казань, 27-28 февраля 2014, Казань: НЦБЖД, 2014. – с. 730-738.

4. Купцов А.И. Численное моделирование сброса опасных газов через свечу при различных метеоусловиях // *Фундаментальные и прикладные исследования в современном мире: IX Междунар. научн.-практич. конф.*, Санкт-Петербург, 11 марта 2015, СПб: Стратегия будущего, 2015. – С. 134-136.

5. Купцов А.И. Моделирование сброса опасного газа со свечи // *Сб. научных трудов I Междунар. научн.-практич. конф. «Актуальные проблемы безопасности жизнедеятельности и экологии»*, Тверь, 25-26 марта 2015, Тверь: ТвГТУ, 2015. – С. 71-73.

6. Kuptsov A. Influence of atmospheric stability on propagation of ethylene, discharged through a vent stack in the ambient environment / A. Kuptsov, F. Gimranov // *International Scientific and Practical Conference “WORLD SCIENCE” (Proceedings of the International Scientific and Practical Conference «Modern Scientific Achievements and Their Practical Application (October 20-21, 2015, Dubai, UAE)»*). — 2015. — 3(3), Vol.1. — pp. 37-39.

7. Zubkov A.G. Modeling emptying equipment through reset with candle / A.G. Zubkov, A.I. Kuptsov, F.M. Gimranov // *International scientific review*, 2015. — №8 (9). — pp. 22-24.

8. Zubkov A.G. Influence of atmospheric stratification on discharge of hazardous gases through a stack to the atmosphere / A.G. Zubkov, A.I. Kuptsov, F.M. Gimranov // *Global Science and Innovation [Text]: materials of the VI International Scientific Conference*, Vol. II, Chicago, November 18-19th, 2015 / publishing office Accent Graphics communications — Chicago — USA, 2015. P. 156-158.

9. Купцов А.И. Опасность выбросов газов через технологические свечи в условиях промышленной застройки / А.И. Купцов, А.Г. Зубков, Ф.М. Гимранов // *Промышленная и экологическая безопасность, охрана труда*, 2015. – №6 (103). – С. 22-23.

10. Купцов А.И. Процедура прогнозирования распространения опасного газа в случае сброса через свечу рассеивания / А.И. Купцов, Ф.М. Гимранов // *Научный альманах*, 2016. - № 7-1 (21). – С. 411-415.