

*На правах рукописи*

Тимошенко Артем Леонидович

**СНИЖЕНИЕ ВЗРЫВОПОЖАРНОЙ ОПАСНОСТИ  
В ЭЛЕКТРОЛИЗНЫХ ЦЕХАХ ТЭЦ НА ОСНОВЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ  
ОБРАЗОВАНИЯ ВОДОРОДНО-ВОЗДУШНЫХ СМЕСЕЙ**

2.10.1. Пожарная безопасность (технические науки)

Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических  
наук

Санкт-Петербург 2025

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России»

**Научный руководитель:** САМИГУЛЛИН Гафур Халафович  
доктор технических наук, профессор

**Официальные оппоненты:** ГОРДИЕНКО Денис Михайлович  
доктор технических наук,  
АНО «Консорциум ПОПСБ»,  
заместитель генерального директора  
по техническому регулированию;

БУГАЕВ Петр Николаевич  
кандидат технических наук,  
ФГАОУ ВО «РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина», кафедра промышленной безопасности и охраны окружающей среды, ассистент

**Ведущая организация:** ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет»

Защита состоится «23» сентября 2025 года в 15:00 часов на заседании совета по защите докторских и кандидатских диссертаций 04.2.003.01 на базе ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России» (196105, Санкт-Петербург, Московский проспект, д. 149).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России» (196105, Санкт-Петербург, Московский проспект, д. 149) и на сайте <https://dsomet.igps.ru>.

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2025 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета 04.2.003.01  
кандидат технических наук, доцент

М.Р. Сытдыков

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### **Актуальность темы исследования**

Водород в больших количествах используется в различных отраслях промышленности, причем, с повышением производственных потребностей возрастают и соответствующие генерирующие мощности. Свидетельством важности данного факта служит утвержденное Правительством Российской Федерации распоряжение от 5 августа 2021 г. № 2162-р «Концепция развития водородной энергетики в Российской Федерации», которое определяет цели и задачи по развитию водородной энергетики в Российской Федерации на период до 2050 года. Необходимость использования водорода в различных сферах топливно-энергетического комплекса, обуславливает высокий уровень опасности процессов получения и применения из-за присущих водороду показателей пожаровзрывоопасности. В частности, низкая вязкость и высокий коэффициент диффузии водородно-воздушной смеси способствует проявлению эффектов стратификации – пространственной неоднородности концентраций, что в свою очередь, существенно усложняет численное моделирование диффузии и распространения водорода в воздухе, образования и горения водородно-воздушных смесей в условиях аварий на предприятиях промышленной энергетики. В связи с этим возникает необходимость в развитии и методических подходов в части обеспечения превентивных мероприятий, особенно в начальный период возникновения аварийных утечек водорода – для своевременного предотвращения образования взрыво- и пожароопасных концентраций в смеси с воздухом.

Таким образом, актуальность исследования обуславливает необходимость решения **научной задачи**, состоящей в научно-методическом обосновании обеспечения пожаро- и взрывобезопасности объектов энергетики, на которых в процессе электролиза вырабатывается водород.

### **Разработанность темы исследования**

Наиболее значимые результаты в изучении взрывопожароопасности водорода и водородсодержащих смесей внесли отечественные специалисты: В.В. Азатян, А.А. Борисов, Б.Е. Гельфанд, В.С. Бабкин, С.М. Когарко, А.Н. Баратов, А.Я. Корольченко, В.К. Макеев, И.А. Болодьян, Ю.Н. Шебеко, Д.М. Гордиенко, С.Г. Цариченко, С.В. Пузач, Г.Х. Самигуллин, И.А. Кириллов, С.Ю. Григорьев, Е.В. Никонова, В.Ю. Навценя, а также зарубежные ученые: М. Stefano, E. Zarei, Ch. Mumby, A. Duclos, P. Middha и другие. В этих работах были исследованы процессы диффузии и накопления водорода в закрытых помещениях, изучены вопросы детонационного, дефлаграционного режимов горения водорода в смеси с воздухом и другими углеводородными газами, а также заложены методические основы математического моделирования

образования взрывоопасных водородсодержащих смесей для широкого спектра начальных условий. Однако в этих подходах недостаточное внимание было уделено особенностям формирования водородно-воздушных смесей в подвижной воздушной среде в диапазоне до взрывных концентраций.

### **Соответствие паспорту заявленной специальности**

Тема работы и содержание исследований соответствуют области исследований, определяемой паспортом специальности 2.10.1. Пожарная безопасность (технические науки), а именно пункту 6 «Исследование и разработка средств, методов и алгоритмов обеспечения пожаровзрывобезопасности технологических процессов и регламентных работ на стадии эксплуатации объектов защиты» и пункту 12 «Разработка научных основ создания систем, методов и технических средств обнаружения, предупреждения и ликвидации аварий, пожаров и взрывов».

**Целью диссертационного исследования** является разработка методики оценки взрывопожарной опасности при получении водорода методом электролиза в электролизных цехах ТЭЦ посредством прогнозирования образования опасных концентраций газо-воздушных смесей.

**В качестве объекта** исследования выбраны электролизные цеха генерации водорода и участки его применения на тепловых электростанциях.

**Предметом исследования** являются процессы образования и распространения водородно-воздушных смесей при возникновении аварийных утечек водорода на производственных объектах ТЭЦ.

Для достижения поставленной цели в диссертационном исследовании необходимо было решить **следующие задачи**:

1) провести обзор статистических данных по авариям и пожарам на объектах получения и применения водорода с определением частоты их возникновения, проанализировать отечественные и зарубежные нормативные источники в области обеспечения пожарной и промышленной безопасности на объектах водородной энергетики;

2) разработать математическую модель образования водородно-воздушных смесей в ограниченном объеме при аварийных утечках водорода в помещениях электролизных цехов ТЭЦ;

3) провести экспериментальные исследования процессов диффузии водорода с образованием водородно-воздушных смесей в диапазонах до взрывных концентраций с учетом параметров приточно-вытяжной вентиляции;

4) предложить практические рекомендации по снижению уровня пожарной опасности в электролизных цехах ТЭЦ при возникновении аварийных утечек водорода.

### **Научная новизна**

1. Определены новые частоты реализации аварийных событий на предприятиях водородной энергетики для различных групп промышленного оборудования и технологических процессов, отличающиеся от существующих возможностью дифференциации расчетно-аналитических процедур при оценке пожарной опасности объектов, на которых обращаются горючие газы.

2. Разработана математическая модель процесса образования газозооушной смеси в помещениях при аварийной утечке водорода, отличающаяся от существующих возможностью прогнозирования момента достижения локальных взрывоопасных концентраций с учетом влияния приточно-вытяжной вентиляции.

3. Получены экспериментальные зависимости о динамике образования водородно-воздушных смесей в диапазоне дозрывных концентрации водорода, а также аналитические зависимости коэффициентов диффузии водорода в зависимости от числа Рейнольдса для нестационарных режимов воздушного потока.

4. Разработана методика, основанная на критериальной модели и отличающаяся от известных реализацией оригинального алгоритма оценки потенциальной взрывопожарной опасности технологического оборудования по интегральному показателю, применяемого при производстве водорода на производственных объектах ТЭЦ.

**Теоретическая значимость работы** заключается в следующем:

- дополнена информационно-справочная база сведениями по частотам реализации аварийных событий при генерации, обращении и утилизации водорода для различных типов производственного оборудования и технологических процессов, расширяющая возможность формирования деревьев отказов и событий, применяемых в анализе и оценке пожарных рисков;
- получены коэффициенты диффузии водорода и коэффициенты участия водорода во взрыве, позволяющие прогнозировать образование локальных взрывоопасных концентраций водородно-воздушных смесей при утечках водорода в различных точках пространства вентилируемого помещения.

**Практическая значимость работы** заключается в следующем:

- применение критериальной модели позволяет проводить дифференциацию по взрывопожарной опасности технологических участков производства и обращения водорода на основе сравнения расчетных и допустимых (безопасных) значений параметров, характеризующих пожарную опасность водорода в производственных условиях;
- математическое моделирование аварийной утечки в вентилируемом помещении при производстве и обращении водорода может быть использовано

в качестве обоснования рационального расположения газоанализаторов и аварийной вентиляции в помещениях, где обращается водород.

### **Методы исследования**

Для решения поставленных задач использовались: сбор и анализ статистических данных; метод экспертных оценок; экспериментальный метод с использованием поверенных средств измерения, регрессионный и корреляционный анализ, компьютерные методы моделирования, статистическая обработка результатов исследований.

### **Положения, выносимые на защиту:**

1. Математическая модель процессов образования и накопления водородно-воздушной смеси при аварийной утечке водорода в вентилируемых помещениях.
2. Расчетно-экспериментальные зависимости динамики концентрации водорода коэффициентов диффузии от режимов движения воздушной среды.
3. Методика оценки взрывопожарной опасности электролизных цехов производства водорода и ее применения на объектах тепловых электростанций.

**Степень достоверности и обоснованность научных результатов** исследования обеспечены корректным применением апробированных научных методов исследования, объективным анализом с применением современного математического аппарата, статистической обработкой экспериментальных данных, согласованностью полученных результатов с данными других исследователей, апробацией научных результатов на всероссийских и международных научно-практических конференциях.

### **Апробация работы**

Основные результаты, полученные в процессе проведенных исследований, обсуждались на: Международной научно-практической конференции «Сервис безопасности в России: опыт, проблемы, перспективы. Мониторинг, предотвращение и ликвидация чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера» (Санкт-Петербург, 2021 г.); XIII Всероссийской научно-практической конференции «Надежность и долговечность машин и механизмов» (Иваново, 2022 г.); Всероссийской научно-практической конференции «Пожарная безопасность: современные вызовы. Проблемы и пути решения» (Санкт-Петербург, 2022 г.); XVI Международной научно-практической конференции молодых ученых «Обеспечение безопасности жизнедеятельности: проблемы и перспективы» (Минск, 2022 г.); Международной научно-практической конференции «Сервис безопасности в России: опыт, проблемы, перспективы. Арктика. Современные вызовы», (Санкт-Петербург, 2022 г.); Международной научно-практической конференции «Пожарная безопасность: современные вызовы. Проблемы и пути решения»

(Санкт-Петербург, 2023 г.); XI Международном научном семинаре-конференции «Пожарная безопасность в условиях современности» (Кокшетау, 2023 г.); XII Международной научной семинар-конференции «Пожарная безопасность в условиях современности» (Кокшетау, 2024 г.).

### **Реализация работы**

Основные результаты диссертационного исследования внедрены в практическую деятельность Башкирской Ассоциации Экспертов в части экспертизы промышленной и пожарной безопасности на опасных производственных объектах топливно-энергетического комплекса Республики Башкортостан; общества с ограниченной ответственностью «Груммант» (г. Санкт-Петербург) в части проведения оценки взрывопожарной опасности технологического оборудования в помещениях при выполнении проектных, строительных и монтажных работ участков генерации и хранения водорода; Балаковской ТЭЦ-4 ПАО «Т Плюс» в части проведения мероприятий по снижению взрывопожарной опасности технологического оборудования в электролизном цехе.

### **Публикации**

По теме исследования опубликовано 15 научных работ, 5 из которых опубликованы в рецензируемых научных изданиях перечня ВАК Минобрнауки РФ. Получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

### **Личный вклад автора**

В совместных публикациях основные научные результаты исследования получены автором лично. Автором проведен анализ нормативно-технической и методической базы в области взрывопожарной безопасности, выполнен сбор и обработка статистических данных по аварийности на объектах производства и обращения водорода; проведены экспериментальные исследования и анализ результатов по формированию водородно-воздушных смесей; выполнено моделирование образования взрывоопасных смесей при утечках водорода; разработана критериальная модель и методика оценки взрывопожарной опасности технологических участков получения и применения водорода.

### **Объем и структура диссертации**

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы (185 наименований) и приложения. Диссертационная работа содержит 160 страниц текста, 38 рисунков и 33 таблицы.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи исследования, научная новизна диссертации и положения,

представляемые на защиту, практическая ценность и апробация полученных результатов, личный вклад соискателя.

В первой главе «**Анализ статистических данных по авариям и пожарам, обзор состояния научно-методической и нормативной базы в области пожарной безопасности на объектах водородной энергетики**» проанализированы статистические данные об аварийности на объектах топливно-энергетического комплекса и подтверждена актуальность обеспечения взрывопожарной безопасности объектов производства и обращения водорода. На основе анализа и сравнения отечественных и зарубежных методических и нормативных документов по оценке взрывопожарной опасности объектов водородной энергетики обоснована необходимость их развития и дополнения. Проведен анализ статистических данных об авариях на объектах производства и использования водорода, полученных из официальной базы данных водородных инцидентов и аварий НИАД 2.1 (рисунок 1).

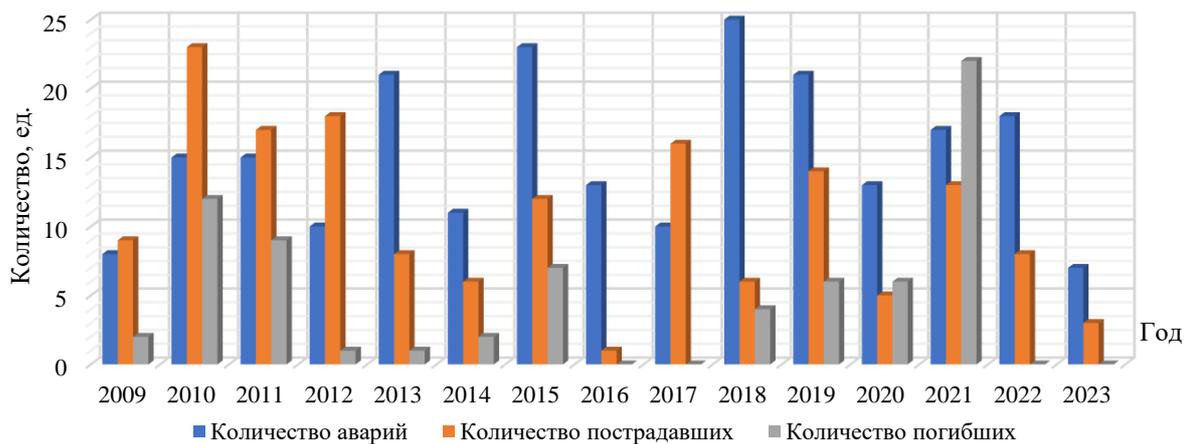


Рисунок 1 – Динамика аварийности на объектах производства и обращения водорода

Выявлено, что за последние 15 лет наибольшее количество аварий произошло в 2018 году – 25 аварий, наибольшее количество пострадавших пришлось на 2010 год – 23 человека, наибольшее количество погибших на данных объектах пришлось на 2021 год (22 человека).

Выполнен расчет частоты реализации аварийных событий для различных типов производственного оборудования, что позволяет расширить возможности расчетно-аналитических процедур при использовании деревьев отказов и событий, определения характеристик событий в оценке пожарных рисков процессов получения и применения водорода (таблицы 1, 2, 3).

Таблица 1 – Частоты реализации аварий для различного оборудования, 1/год

Наименование оборудования	Частота реализации аварии
Оборудование для транспортирования водорода	$6,61 \cdot 10^{-5}$
Резервуары; емкости, сосуды	$5,95 \cdot 10^{-5}$
Технологические трубопроводы	$3,70 \cdot 10^{-5}$
Компрессоры, насосы	$1,85 \cdot 10^{-5}$
Химические реакторы	$1,72 \cdot 10^{-5}$
Технологическое оборудование с жидким водородом	$9,26 \cdot 10^{-6}$
Технологические аппараты под давлением	$1,01 \cdot 10^{-8}$

Таблица 2 – Частоты реализации взрывов, пожаров и утечек на объектах производства и обращения водорода, 1/год

Событие	Частота реализации
Угроза аварии	$9,13 \cdot 10^{-5}$
Взрыв	$8,60 \cdot 10^{-5}$
Пожар	$7,41 \cdot 10^{-5}$
Утечка без воспламенения	$5,70 \cdot 10^{-5}$

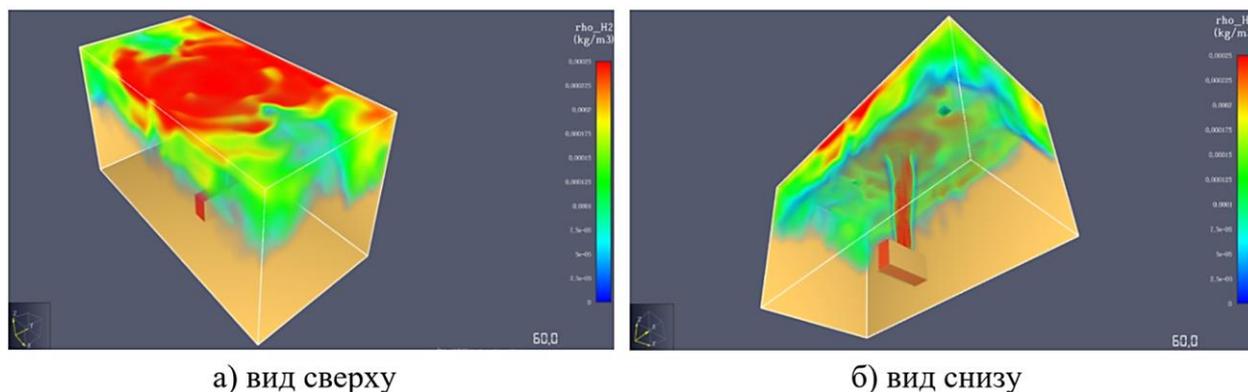
Таблица 3 – Частоты реализации аварий в различных отраслях на объектах производства и обращения водорода, 1/год

Отрасль промышленности	Частота реализации аварии
Транспортные средства с водородным двигателем	$7,14 \cdot 10^{-4}$
Транспортировка и распределительные сети	$6,08 \cdot 10^{-4}$
Химическая/нефтехимическая промышленность	$1,08 \cdot 10^{-4}$
Производство водорода	$9,26 \cdot 10^{-5}$
Стационарные топливные элементы	$2,60 \cdot 10^{-5}$
Водородные заправочные станции	$1,59 \cdot 10^{-5}$
Атомная энергетика	$1,06 \cdot 10^{-5}$
Хранение водорода	$2,6 \cdot 10^{-6}$

Приведенные выше сведения по частотам реализации аварийных событий позволяет усовершенствовать процесс построения деревьев событий и повысить достоверность результатов по расчетной оценке пожарных рисков на объектах водородной энергетики.

Во второй главе «Компьютерное моделирование процессов образования водородно-воздушной смеси при утечках водорода на производственных объектах ТЭЦ» приведено описание типового электролизного цеха на ТЭЦ, где происходит генерация водорода,





а) вид сверху  
 б) вид снизу  
 Рисунок 3 – Результаты моделирования распространения водорода при аварийной утечке из трубопровода на 60 секунде

Выявлены закономерности аварийного распространения водородно-воздушного облака при естественной вентиляции, что может быть использовано для прогнозирования аварийных ситуаций и их последствий. Показано, что естественная вентиляция в рассматриваемом режиме не обеспечивает достаточного разбавления водорода, что требует оснащение постоянно действующей приточно-вытяжной вентиляцией в электролизных цехах (рисунок 4). Как видно из графика изменения концентрации в точке в центре под потолком, кривая концентрации резко увеличивается в первые 15 секунд, затем в течение 120 секунд динамично изменяется, поочередно убывая и возрастая. Впоследствии после перекрытия запорного устройства (от 120 до 600 секунд) концентрация водорода снижается.

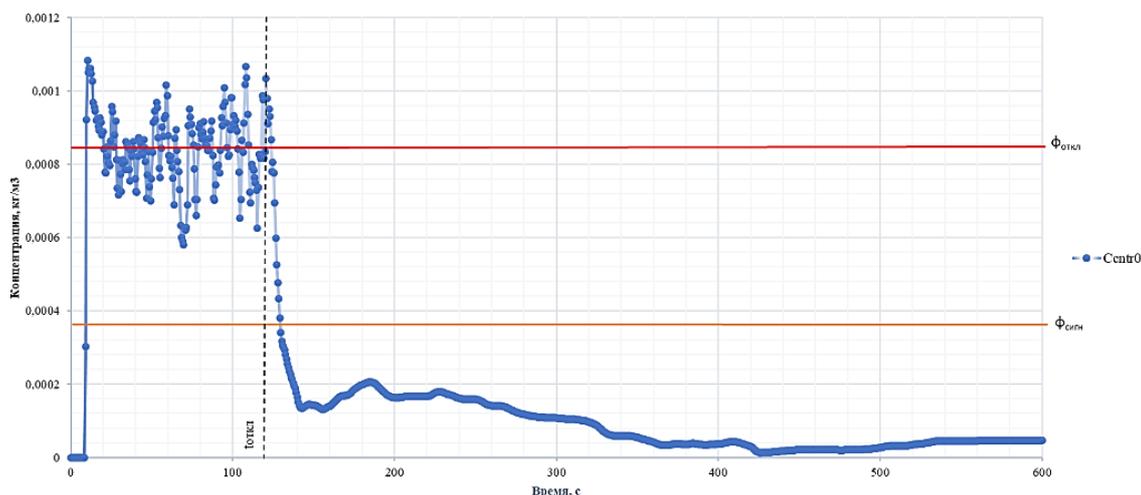
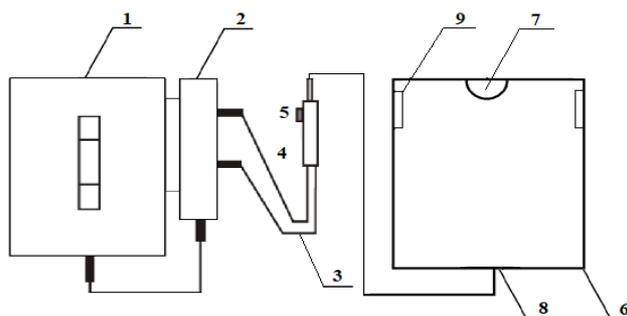


Рисунок 4 – График изменения концентрации водорода в центре помещения (над местом утечки) на высоте 5 метров

Разработанный метод моделирования при помощи программного обеспечения FDS может быть применен для обоснования обустройства вентиляционных систем в производственных помещениях, а также в качестве

инструмента для определения рационального размещения датчиков газоанализатора в помещениях электролизных цехов ТЭЦ.

В третьей главе «**Экспериментальное исследование процессов образования водородно-воздушной смеси при аварийных утечках водорода**» приведены представлены результаты экспериментальных исследований по образованию водородно-воздушных смесей при аварийной утечке водорода в ограниченном объеме помещения размерами 10х5х5 м, имитирующего электролизный цех в уменьшенном масштабе (рисунок 5).



а)

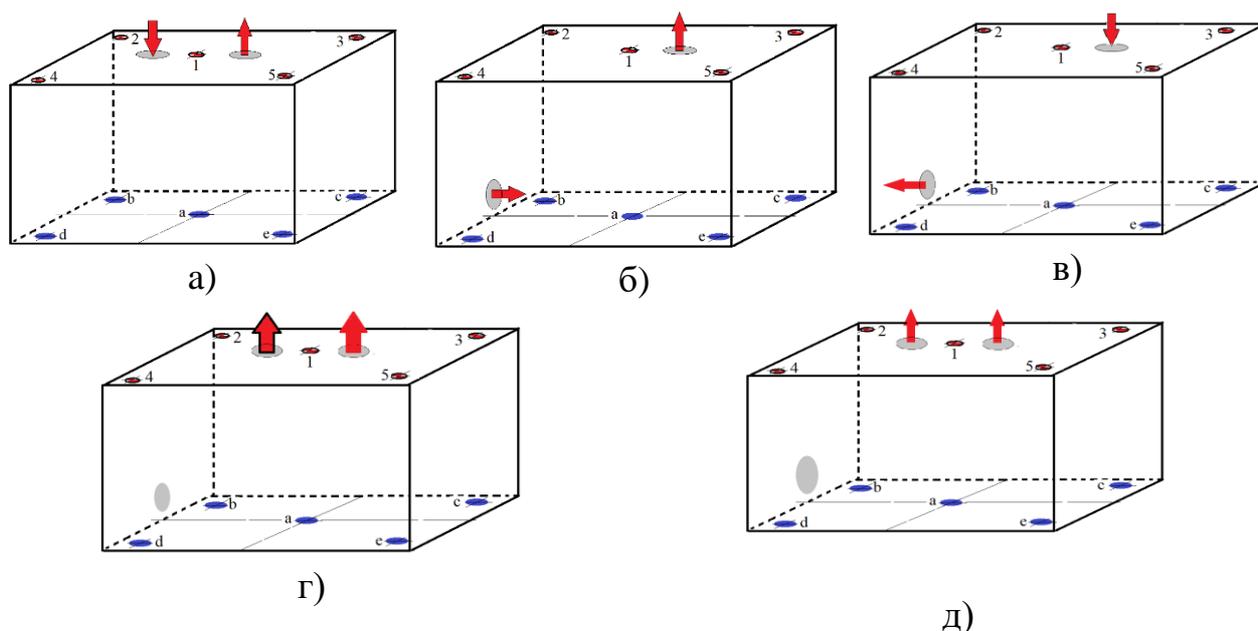
б)

а) фото; б) схема; 1 – блок электролизера; 2 – охладитель-обогащитель; 3 – шланги; 4 – пламегаситель; 5 – регулятор качества газа; 6 – корпус модельного помещения; 7 – датчик автоматического газоанализатора; 8 – источник утечки газа; 9 – вентиляторы

Рисунок 5 – Экспериментальная установка для моделирования аварийной утечки водорода

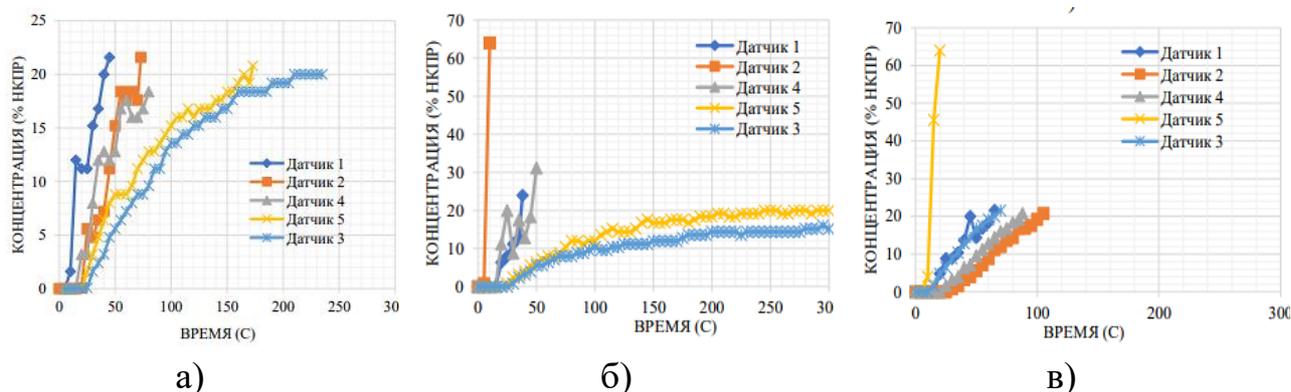
С учетом основных требований по обеспечению взрыво- пожароопасности в электролизных цехах ТЭЦ, предусматривающих применение вентиляции, предложен алгоритм расчета принудительной приточно-вытяжной вентиляции по нормируемой кратности воздухообмена. В экспериментах реализовано пять режимов вентиляции различной кратности, воспроизводящих прямоточное, противоточное и перекрестно-точное движение воздушных и водородных потоков (рисунок 6).

Отдельные результаты эксперимента, представляющие зависимость концентрации водорода от времени истечения водорода для различных режимов вентиляции приведены на рисунке 7.



- а) режим аварийной вентиляции №1; б) режим аварийной вентиляции №2;  
 в) режим аварийной вентиляции №3; г) режим аварийной вентиляции №4;  
 д) режим аварийной вентиляции №5;

Рисунок 6 – Варианты организации аварийной вентиляции модельного помещения электролизного цеха



- а) в точке А; б) в точке В; в) в точке Е

Рисунок 7 – Результаты экспериментальных измерений концентрации водорода при режиме вентиляции №1 для различных точек утечки

По экспериментальным данным было установлено, что время срабатывания датчиков лежит в широких пределах от 7 сек. до 180 сек., что позволило провести сравнительную оценку эффективности размещения газоанализатора в припотолочной области модельного помещения в зависимости от расположения места утечки (таблица 4).

Датчики, расположенные на максимальном удалении от места утечки, срабатывают через 250–300 секунд или не активируются вовсе. Датчики, находящиеся на небольшом удалении от места утечки показали промежуточные результаты по времени, в интервале от 50 до 250 секунд.

Таблица 4 – Усредненное время достижения концентрации водорода 20 % НКПР (с)

Номер датчика	Точка утечки	Режимы вентиляции				
		1	2	3	4	5
1	a	30	80	70	100	65
2	b	7	8	11	10	7
3	c	10	7	6	190	40
4	d	7	8	8	15	17
5	e	12	96	20	180	50
<b>Среднее время</b>		<b>13,2</b>	<b>39,8</b>	<b>23</b>	<b>99</b>	<b>35,8</b>

По результатам экспериментальных исследований был сделан вывод о влиянии скорости и направления воздушного потока на процессы диффузии водорода в объеме модельного помещения. Определен диапазон значений коэффициента диффузии  $D$  при постоянной утечке водорода в условиях принудительной вентиляции, лежащий в пределах от  $(210...3650) \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ , что в несколько порядков превышает значение в стационарных условиях. Опираясь на динамику изменения концентрации, были исследованы особенности образования взрывоопасных зон при аварийной утечке водорода в вентилируемом помещении: установлены зоны движения водородно-воздушных потоков: зона утечки, зона распространения водорода, зона воздействия воздушных потоков и застойная зона.

Выявлены зависимости коэффициента диффузии водорода в верхней точке помещения от числа Рейнольдса для движения воздушных потоков для 5 режимов вентиляции. Для режимов 1 и 2 наблюдается линейная зависимость увеличения коэффициента диффузии водорода от числа Рейнольдса. При этом величина достоверности аппроксимации близка к единице. Для режимов 3 – 5 зависимость нелинейна и имеется низкая достоверность аппроксимации, близкая к нулю.

По значениям концентрации водорода в различных точках модельного помещения проведены расчеты коэффициентов участия водорода во взрыве  $Z$  (таблица 4), которые значительно меньше соответствующего значения в СП 12.13130.2009.

Таблица 4 – Максимальные значения коэффициентов участия во взрыве при различных режимах вентиляции

Режим вентиляции	1	2	3	4	5
$Z_{\text{в}}$	0,10	0,13	0,60	0,12	0,43

По экспериментальным данным была проведена оценка адекватности

математической модели формирования водородно-воздушной смеси, которая показала возможность прогнозирования времени и областей образования максимальных концентраций водорода с применением поправочных коэффициентов (рисунок 8).

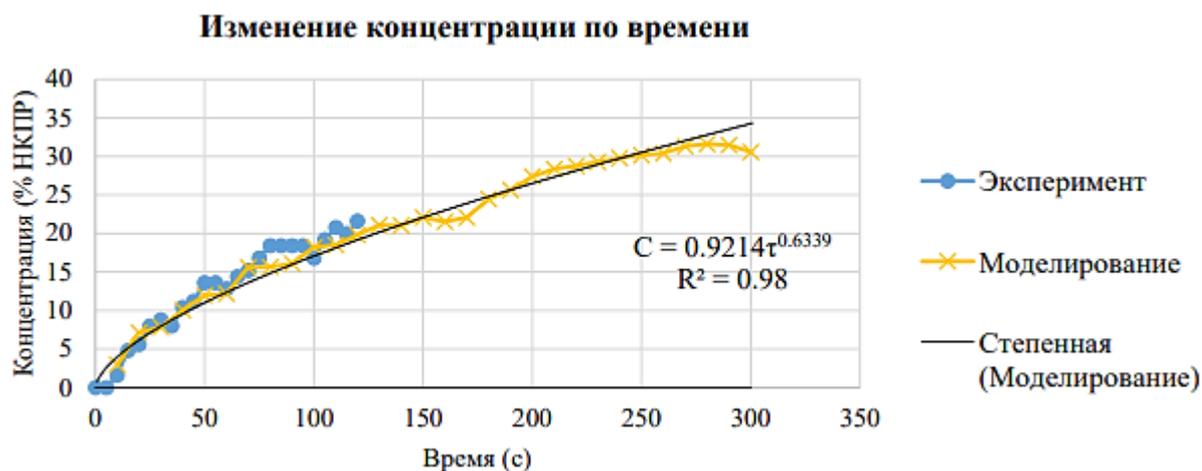


Рисунок 8 – Оценка адекватности результатов моделирования аварийной утечки

Коэффициент детерминации свидетельствует об очень сильной взаимосвязи между расчетными и экспериментальными значениями. t-критерий Стьюдента  $t_{\text{факт}} > t_{\text{табл}}$ , значит коэффициент регрессии статистически значимо отличен от нуля. Критерий Фишера  $F_{\text{факт}} > F_{\text{табл}}$ , признается статистическая значимость уравнения регрессии на уровне значимости  $\alpha = 0,05$ , следовательно гипотеза  $H_0: \beta = 0$  отвергается, т.е. согласно тесту Фишера регрессия адекватна.

В четвертой главе «**Методика оценки взрывопожарной опасности объектов производства и обращения водорода на производственных объектах ТЭЦ**» построена критериальная модель оценки взрывопожарной опасности технологического оборудования объектов производства и обращения водорода. Данная модель позволяет реализовать комплексный подход при рассмотрении взрывопожарной безопасности объектов производства и обращения водорода (категории взрывопожарной опасности «А») посредством определения расчетных показателей (критериев) для оборудования на технологических участках, сравнения их с допустимыми (безопасными) значениями и отнесения к определенной категории взрывопожарной опасности.

Представлено универсальное множество, характеризующее состояние взрывопожаробезопасности технологического процесса производства и обращения водорода и включающее в себя определенные подмножества:

$$X = \{ x^{\text{исх}}, x^{\text{доп}}, x^{\text{спр}}, x^{\text{расч}} \}, \quad (2)$$

где  $x^{\text{исх}}$  – множество исходных (задаваемых пользователем) параметров, влияющий на взрывобезопасность водородного оборудования;  $x^{\text{доп}}$  – множество допустимых (предельных) параметров, влияющих на взрывопожарную безопасность водородного оборудования;  $x^{\text{спр}}$  – множество справочных параметров, влияющих на взрывобезопасность водородного оборудования;  $x^{\text{расч}}$  – множество расчетных параметров, влияющих на взрывобезопасность водородного оборудования.

Представлены способы определения количественных параметров критериальной модели, некоторые из которых скорректированы исключительно для водорода. Предложено проводить определение уровня опасности посредством расчета показателей, характеризующих пожарную опасность водорода и сравнение их с допустимыми значениями критериев.

Переменная  $Q_i$ , принимающая значения 0 или 1 в зависимости от условия взрывобезопасности при оценке уровня взрывопожарной опасности технологического оборудования, в которых обращается водород, представлена в следующем виде:

$$Q_i = \begin{cases} 1; & x_i^{\text{расч}} \geq x_i^{\text{доп}}; \\ 0; & x_i^{\text{расч}} \leq x_i^{\text{доп}} \end{cases} \quad (i = 1, \dots, 10), \quad (3)$$

где  $x_i^{\text{расч}}$  – фактическое значение параметра источника взрывопожарной опасности;  $x_i^{\text{доп}}$  – допустимое значение параметра источника взрывопожарной опасности.

В результате получившееся значение интегрального показателя  $S$  является критерием, по которому технологическому участку присваивается категория уровня взрывопожарной опасности (таблица 6):

$$S = \sum_{i=1}^{10} Q_i \cdot \lambda_i. \quad (4)$$

$Q_{ij}$  – критерий взрывопожарной безопасности технологического участка;

$\lambda_i$  – коэффициент весомости  $i$ -го параметра;

Применяемый показатель весомости критериев в виде коэффициента  $\lambda_i$  был определен методом опроса экспертов.

В рамках критериальной модели предложена дифференциация технологического оборудования по потенциальной опасности, положенная в основу алгоритма оценки уровня взрывопожароопасности технологического оборудования объектов производства и обращения водорода (таблица 6).

Произведена оценка степени значимости расчетных параметров методом экспертного опроса, было установлено, что наиболее значимым параметром оказалась скорость нарастания давления взрыва  $dp/dt$ , наименее значимым предельная скорость срыва диффузионного факела  $u_0$  (таблица 7).

Таблица 6 – Критерии отнесения технологического участка, на которой размещено водородное оборудование, к определенной категории уровня взрывопожарной опасности

Категория уровня взрывопожарной опасности	Критерии
Высокая	$0,75 < S \leq 1$
Средняя	$0,5 < S \leq 0,75$
Умеренная	$0,25 < S \leq 0,5$
Низкая	$0 < S \leq 0,25$

Таблица 7 – Анализ значимости исследуемых параметров

Степень значимости	Параметры	Сумма рангов	Вес $\lambda$
Мало значимые	Предельная скорость срыва диффузионного факела $x_7$	88	0,027
	Минимальная флегматизирующая концентрация газообразного флегматизатора $x_5$	87	0,029
	Верхний концентрационный предел распространения пламени $x_3$	80	0,044
Значимые	Температура самовоспламенения $x_9$	71	0,064
	Нижний концентрационный предел распространения пламени $x_2$	63	0,082
	Нормальная скорость распространения пламени $x_6$	53	0,104
Критически значимые	Максимальное давление взрыва $x_4$	33	0,149
	Минимальная энергия зажигания $x_{10}$	31	0,153
	Безопасный экспериментальный максимальный зазор $x_1$	24	0,169
	Скорость нарастания давления взрыва $x_8$	20	0,178

Произведенная оценка согласованности мнений экспертов показала удовлетворительные результаты.

Приведены результаты апробации на электролизных цехах ТЭЦ, использующих водородные системы в качестве охлаждения турбогенераторов (таблица 8).

Таблица 8 – Результаты апробации модели на объектах ТЭЦ

Критерий	Значение	
	ТЭЦ №1	ТЭЦ №2
$\Delta P$ , кПа	33,21	40,72
$t_{сам}$ , К	783	783
$\delta_{бэмз}$ , м	0,00023	0,00023
$\varphi_H - \varphi_B$ , % (об.)	3,90 – 76,83	3,90 – 76,83
$S_u$ , м/с	3,47	3,47
$\varphi_f$ , % (об.)	АУГП отсутствует	АУГП отсутствует
$dp/dt$ , кПа/с	647,49	498,79
$W_{min}$ , мДж	$3,15 \cdot 10^{-3}$	$3,15 \cdot 10^{-3}$
$u_0$ , м/с	1066,4	1066,4
S	6	6
Категория	Средняя	Средняя

Проиллюстрирован алгоритм оценки уровня взрывопожароопасности технологического оборудования объектов производства и обращения водорода (рисунок 9).

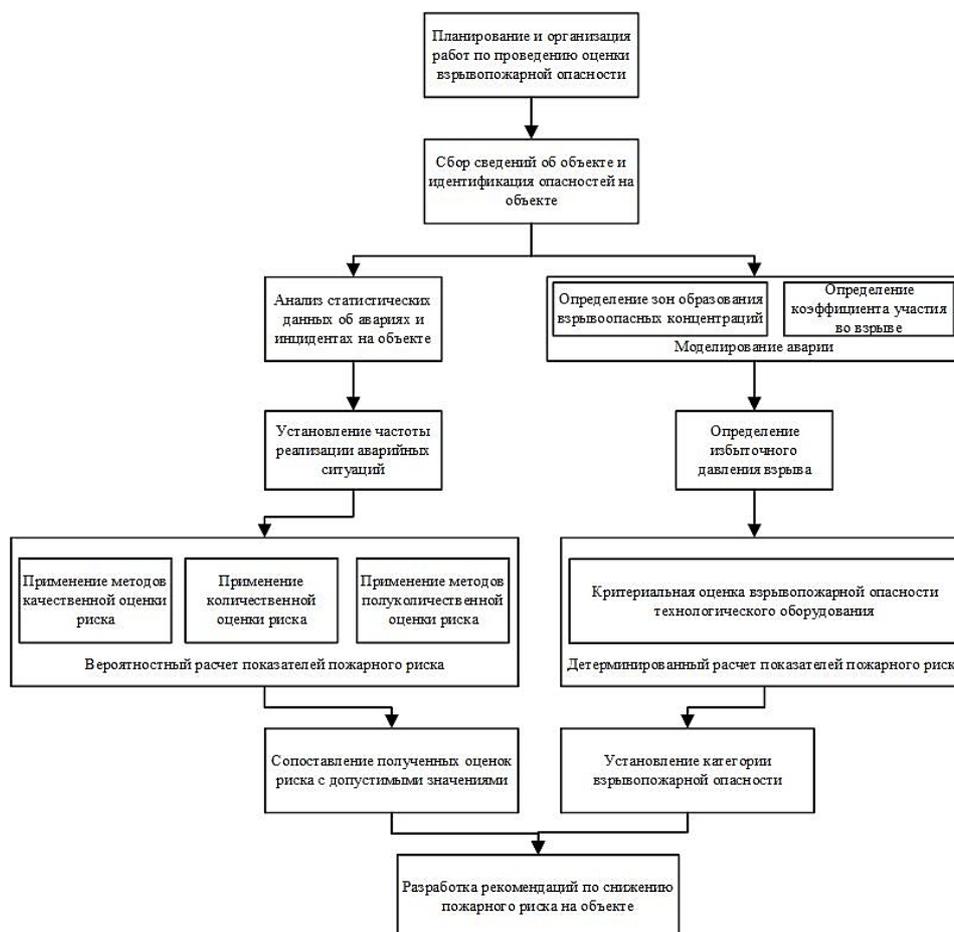
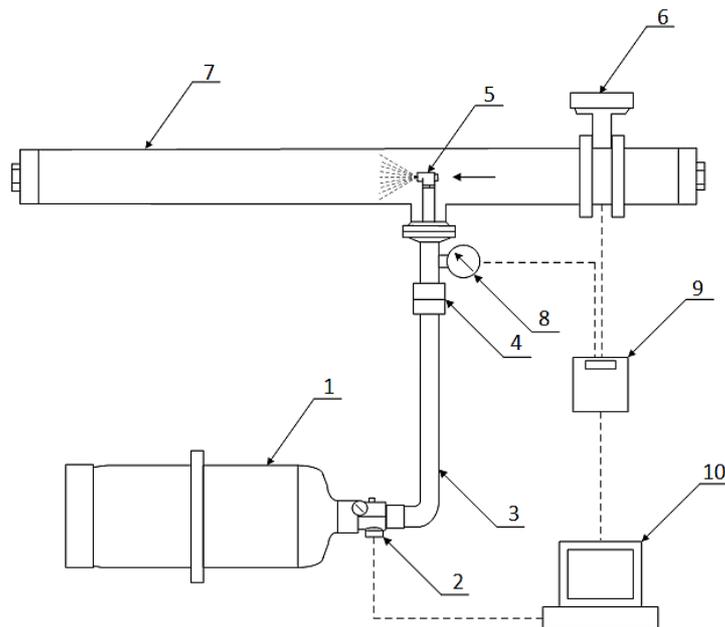


Рисунок 9 – Методика взрывопожарной опасности производства и обращения водорода на производственных объектах ТЭЦ

Предложена методика оценки взрывопожарной опасности объектов производства и обращения водорода, позволяющая на основе применения прогнозных значений динамики концентрации водорода, уточненных значений коэффициента диффузии водорода, коэффициента участия водорода взрыве повысить точность и достоверность расчетов при анализе и оценке пожарных рисков.

На примере сценария разрыва трубопровода с водородом (диаметр 50 мм) на полное сечение с последующим взрывом образовавшейся газовой смеси с учетом коэффициента участия во взрыве при естественной и принудительной вентиляции рассчитаны значения индивидуального пожарного риска. Величина индивидуального пожарного риска при естественной вентиляции превышает индивидуальный пожарный риск при принудительной вентиляции в 4 раза.

В качестве рекомендации снижения взрывопожарной опасности объекта производства и обращения водорода предложена система введение газовых средств тушения пожара в магистраль, по которой поступает водород в определяемый заранее защищенный участок трубопровода (рисунок 10).



1 – источник (баллон) ингибитора; 2 – запорно-пусковое устройство; 3 – магистральная линия (напорный патрубок); 4 – обратный клапан; 5 – инжекционный узел (насадок); 6 – запорное устройство (задвижка с электроприводом); 7 – трубопровод транспортировки водорода; 8 – датчик давления водорода; 9 – блок управления; 10 – АСУ ТП

Рисунок 10 – Устройство введения газовых огнетушащих веществ в трубопровод

Сущность разработанного технического решения состоит в предотвращении воспламенения и взрыва водородно-воздушных смесей при разгерметизации трубопровода в процессе транспортировки водорода, а также прекращение факельного горения в случае воспламенения водородно-воздушной смеси.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках диссертационного исследования представлены результаты решения научной задачи, состоящей в обеспечении пожаровзрывобезопасности объектов производства водорода методом электролиза на тепловых электростанциях посредством прогнозирования и предотвращения образования взрывоопасных концентраций водородно-воздушных смесей при возникновении аварийных утечек водорода. Цель диссертационного исследования достигнута путем последовательного выполнения следующих задач:

1. Проведен анализ статистических данных об аварийности при

производстве и использовании водорода, выполнен обзор научных и нормативно-технических источников в области оценки взрывопожарной опасности объектов топливно-энергетического комплекса, подтверждена актуальность и обоснована необходимость развития и дополнения отечественной нормативной базы в данной области, определены частоты реализации аварийных событий для различных типов производственного оборудования и технологических процессов. Сравнительный расчет частот результирующих событий по справочным нормативным данным предлагаемым значениям по типовым деревьям событий показал расхождение в пределах от 76 % до 340 %, что свидетельствует о необходимости учета реальных статистических сведений на объектах производства и обращения водорода.

2. Разработана математическая модель образования водородно-воздушных смесей при аварийных утечках водорода на производственных объектах ТЭЦ с помощью полевого метода с использованием вычислительного процессора FDS и графического интерфейса PyroSim, реализующей математические модели физико-химических процессов диффузии водорода. Выполнено компьютерное моделирование аварийной утечки водорода в электролизном цехе ТЭЦ при естественной вентиляции, было показано, что естественная вентиляция не обеспечивает достаточного разбавления водорода и способствует его накоплению, что повышает вероятность образования взрывопожароопасных концентраций.

3. Проведены экспериментальные исследования процессов диффузии водорода с образованием водородно-воздушных смесей, в ходе которых определены концентрации водорода при его аварийной утечке в вентилируемое модельное помещение с воспроизведением прямоточного, противоточного и перекрестно-точного направления перемещения воздуха и водорода. Экспериментально было установлено время срабатывания датчиков в интервале от 7 сек. до 110 сек. и проведена сравнительная оценка эффективности размещения газоанализатора в зависимости от расположения места утечки.

По динамике концентрации водорода в различных областях модельного помещения проведены расчеты коэффициентов участия водорода во взрыве  $Z$ , полученные значения которых лежат в интервале (0,1...0,6) и коэффициентов диффузии  $D$  в пределах  $(210...3650) \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ , а также были установлены зависимости коэффициента диффузии водорода от числа Рейнольдса для различных режимов вентиляции.

4. Разработана методика оценки взрывопожарной опасности производства и обращения водорода на производственных объектах ТЭЦ, основанная на критериальной модели, позволяющая на основе применения прогнозных значений динамики концентрации водорода, уточненных значений

коэффициента диффузии водорода, коэффициента участия водорода взрыве повысить точность и достоверность расчетов при оценке пожарных рисков. Применение методики позволило снизить взрывопожарную опасность на электролизных цехах ТЭЦ более чем в 2 раза, что подтверждается расчетами индивидуального пожарного риска.

Приведены результаты апробации на электролизных цехах ТЭЦ, использующих водородные системы в качестве охлаждения турбогенераторов. Проиллюстрирован алгоритм оценки уровня взрывопожароопасности производства и обращения водорода на производственных объектах ТЭЦ.

5. Предложены практические рекомендации по снижению уровня пожарной опасности в электролизных цехах ТЭЦ при возникновении аварийных утечек водорода, которые заключаются в обосновании рационального расположения газоанализаторов и аварийной вентиляции в помещениях, где обращается водород, на основе математического моделирования аварийной утечки водорода.

Перспективами дальнейших исследований являются развитие и разработка наиболее точных методов оценки взрывопожарной опасности при помощи методов численного моделирования, в том числе моделей, построенных с помощью методов вычислительной гидродинамики и анализа турбулентных потоков. При этом необходима дальнейшая валидация для подтверждения адекватности и повышения точности моделируемых данных прогнозирования вероятных зон скопления водорода при различных температурах, давлениях и движениях воздушных потоков в помещении и создания наиболее точных сценариев аварии.

## **СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

**Статьи в ведущих рецензируемых научных журналах и изданиях, рекомендованных ВАК при Министерстве науки и высшего образования Российской Федерации:**

1. Тимошенко, А. Л. Проблема нормативного обеспечения пожарной и промышленной безопасности на объектах производства водорода методом паровой конверсии природного газа / А. Л. Тимошенко, Г. Х. Самигуллин // Проблемы управления рисками в техносфере. – 2022. – № 1 (61). – С. 44-50, 0,44/ 0,22 п.л.

2. Тимошенко, А. Л. Критериальная модель оценки уровня пожарной опасности технологического оборудования водородной энергетики / А. Л. Тимошенко, Г. Х. Самигуллин // Проблемы управления рисками в техносфере. – 2023. – № 3. – С. 96-105, 1,0/0,5 п.л.

3. Тимошенко, А. Л. Модель аварийной утечки водородсодержащего газа

в вентилируемом помещении в программном обеспечении Fire Dynamics Simulator (FDS) / А. Л. Тимошенко, Г. Х. Самигуллин, В. О. Булатов // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2024. – Т. 13, № 1 (65). – С. 176-187, 0,69/0,23 п.л.

4. Тимошенко, А. Л. Общие принципы оценки взрывопожарной опасности объектов производства и обращения водородсодержащего газа / А.Л. Тимошенко // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2024. – Т. 13, № 2 (66). – С. 235-249, 1,13 п.л.

5. Тимошенко, А. Л. Сведения по частотам реализации аварийных событий на объектах производства и обращения водорода / А. Л. Тимошенко, Г. Х. Самигуллин, С. А. Ребезов // Проблемы управления рисками в техносфере. – 2024. – № 2. – С. 127-139, 1,44/0,48 п.л.

#### **Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ:**

6. Тимошенко, А. Л. Расчет пожарного риска технологического участка объекта водородной энергетики / А. Л. Тимошенко, Д. В. Медведев, Г. Х. Самигуллин // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ RU 2023663736, 27.06.2023. Заявка от 06.06.2023 – 4,91/1,64 Мб.

#### **Статьи в иных научных изданиях:**

7. Тимошенко, А. Л. Водород как альтернативное топливо. Перспективы и проблемы внедрения в топливную промышленность / А. Л. Тимошенко // Сервис безопасности в России: опыт, проблемы, перспективы. Мониторинг, предотвращение и ликвидация чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера: материалы Международной научно-практической конференции, 28 октября 2021 г. – Санкт-Петербург. – 2021. – С. 631-634, 0,19 п.л.

8. Тимошенко, А. Л. Анализ зарубежных нормативных документов, регулирующих пожарную и промышленную безопасность водородных топливных элементов / А. Л. Тимошенко, Г. Х. Самигуллин // Пожарная безопасность: современные вызовы. Проблемы и пути решения: материалы Всероссийской научно-практической конференции, 26 апреля 2022 г. – Санкт-Петербург. – 2022. – С. 178-180, 0,25/0,12 п.л.

9. Тимошенко, А. Л. Моделирование последствий аварий на установках паровой конверсии метана / А. Л. Тимошенко, Г. Х. Самигуллин // Надежность и долговечность машин и механизмов: материалы XIII Всероссийской научно-практической конференции, 14 апреля 2022 г. – Иваново. – 2022. – С. 257-260, 0,25/0,12 п.л.

10. Тимошенко, А. Л. Моделирование последствий аварий на установках паровой конверсии метана / А. Л. Тимошенко, Г. Х. Самигуллин // Обеспечение безопасности жизнедеятельности: проблемы и перспективы: материалы XVI Международной научно-практической конференции молодых ученых: в 2-х

томах, Т. 1. – Минск: УГЗ. – 2022. – С. 98-99, 0,13/0,06 п.л.

11. Тимошенко, А. Л. Текучесть – взрывопожароопасное свойство водорода / А. Л. Тимошенко, Г. Х. Самигуллин // Сервис безопасности в России: опыт, проблемы, перспективы. Арктика – регион стратегических интересов: правовая политика и современные технологии обеспечения безопасности в Арктическом регионе: материалы Международной научно-практической конференции, 27 октября 2022 г. – Санкт-Петербург. – 2022. – С. 289-292, 0,31/0,16 п.л.

12. Тимошенко, А. Л. Показатели, необходимые для оценки пожарной опасности водорода / А. Л. Тимошенко, Г. Х. Самигуллин, Е. Б. Алексеик // Пожарная безопасность: современные вызовы. Проблемы и пути решения: материалы Международной научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 27 апреля 2023 года. – Санкт-Петербург. – 2023. – С. 112-115, 0,25/ 0,08 п.л.

13. Тимошенко, А. Л. Применение лабораторного электролизера для исследования инерционности газоанализатора, установленного в модельном производственном помещении / Тимошенко А. Л., Г. Х. Самигуллин, Р. С. Сташков, А. А. Королев // Пожарная безопасность в условиях современности: материалы XI Международного научного семинара-конференции. – Кокшетау. – 2023. – С. 100-102, 0,19/0,05 п.л.

14. Тимошенко, А. Л. Метод определения оптимальной высоты газоанализатора при малых утечках водородосодержащего газа / А. Л. Тимошенко, С. А. Ребезов // Природные и техногенные риски (физико-математические и прикладные аспекты). 2024. № 1 (49). С. 6-15, 0,63/0,32 п.л.

15. Тимошенко, А. Л. Принципы оценки взрывопожарной опасности объектов производства и обращения водородсодержащего газа / Г. Х. Самигуллин, Е. Б. Алексеик // Пожарная безопасность в условиях современности: материалы XII Международного научного семинара-конференции. – Кокшетау. – 2024. – С. 14-16, 0,19/0,07 п.л.

Подписано в печать

26.06.2025

Формат 60x84 1/16

Печать цифровая

Объем 1 п.л.

Тираж 100 экз.

---

Отпечатано в Санкт-Петербургском университете ГПС МЧС России  
196105, Санкт-Петербург, Московский проспект, д. 149