

ОТЗЫВ

официального оппонента доктора технических наук
Гордиенко Дениса Михайловича на диссертацию Тимошенко Артема
Леонидовича на тему «Снижение взрывопожарной опасности в электролизных
цехах ТЭЦ на основе прогнозирования образования водородно-воздушных
смесей», представленную на соискание ученой степени
кандидата технических наук по специальности 2.10.1. Пожарная безопасность
(технические науки)

Актуальность заявленной темы диссертационного исследования не вызывает сомнений, поскольку Правительством Российской Федерации в области обеспечения энергетической безопасности России разработаны и реализуются «План мероприятий по развитию водородной энергетики в России до 2024 года» и «Концепции развития водородной энергетики в Российской Федерации». Согласно официальным прогнозам аналитических компаний, объем производства водорода в топливно-энергетическом комплексе увеличивается, в том числе в электролизных цехах теплоэлектроцентралей. В связи с этим, существует настоятельная необходимость в развитии 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, в первую очередь, в электролизных цехах теплоэлектроцентралей.

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

В качестве научной задачи исследования соискателем сформулирована необходимость провести научно-методическое обоснование обеспечения пожаро- и взрывобезопасности объектов энергетики, на которых в процессе электролиза вырабатывается водород.

Для достижения поставленной цели автором решены следующие задачи исследования:

- 1) Проведен 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) Разработана математическая модель образования водородно-воздушных смесей в ограниченном объеме при аварийных утечках водорода в помещениях электролизных цехов ТЭЦ.

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

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

Диссертационная работа Тимошенко А.Л. включает в себя введение, четыре главы, заключение, список литературы (185 наименований) и 7 приложений; содержит 160 страниц текста, 38 рисунков, 33 таблиц.

На защиту вынесены:

- математическая модель процессов образования и накопления водородно-воздушной смеси при аварийной утечке водорода в вентилируемых помещениях;
- расчетно-экспериментальные зависимости динамики концентрации водорода коэффициентов диффузии от режимов движения воздушной среды;
- методика оценки взрывопожарной опасности электролизных цехов производства водорода и его применения на объектах тепловых электростанций.

Научная новизна результатов

Существенными результатами, обладающими признаками научной новизны, следует считать следующие достижения: соискателем установлены новые частоты возникновения аварийных ситуаций на объектах водородной энергетики для различных категорий промышленного оборудования и технологических процессов. Отличие от существующих подходов заключается в возможности дифференцированного применения расчетно-аналитических методов при оценке пожарного риска на объектах, использующих горючие газы. Автором разработана математическая модель формирования газовой смеси в помещениях при аварийных утечках водорода. Данная модель отличается от аналогов способностью прогнозировать момент достижения локальных взрывоопасных концентраций с учетом воздействия приточно-вытяжной вентиляции.

Тимошенко А.Л. экспериментально определил ранее не встречавшиеся закономерности динамики образования водородно-воздушных смесей в диапазоне до взрывных концентраций водорода. Автором выявлены новые аналитические зависимости коэффициентов диффузии водорода от числа

Рейнольдса для нестационарных режимов воздушного потока. В диссертации была предложена новая методика, базирующаяся на критериальной модели, отличие от известных аналогов состоит в использовании оригинального алгоритма оценки взрывопожарной опасности технологического оборудования по интегральному показателю, актуальному для объектов производства и обращения водорода.

Теоретическая значимость диссертации обусловлена дополнением информационной базы данных 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; получением коэффициентов 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 состоит в применении критериальной модели, которая 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; математическом моделировании 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.

Достоверность и обоснованность результатов диссертационного исследования подтверждается корректностью использования апробированных методов исследования, объективным анализом с использованием современного математического аппарата, применением поверенного экспериментального оборудования, статистической обработкой экспериментальных данных, сравнением полученных результатов исследования данным других авторов, апробацией на всероссийских и международных научно-практических конференциях, а также на реальных промышленных объектах, использованием верифицированных программных комплексов компьютерного моделирования.

Результаты диссертационной работы нашли практическое применение в деятельности ряда организаций:

Башкирской ассоциации экспертов, которая использует разработки соискателя при Экспертов в части экспертизы промышленной и пожарной

безопасности на опасных производственных объектах топливно-энергетического комплекса Республики Башкортостан.

ООО «Грумант» (г. Санкт-Петербург), применяющей предложенные соискателем методики при оценке взрывопожарной опасности технологического оборудования на этапах проектирования, строительства и монтажа участков генерации и хранения водорода.

Балаковской ТЭЦ-4 ПАО «Т Плюс», использующей научные результаты при разработке организационно-технических решений по обеспечению взрывопожарной безопасности; при оптимизации размещения газоаналитического оборудования и систем аварийной вентиляции в электролизном цехе.

Во введении автором обосновывается актуальность диссертационного исследования, проанализирована степень её научной разработанности, определены объект и предмет исследования, показана научная новизна, теоретическая и практическая значимости, методы исследования, приведены положения, выносимые на защиту, степень достоверности и обоснованность научных результатов, апробация и реализация работы, публикации и личный вклад автора.

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» автор провел анализ научных, нормативно-технических и методических источников в области оценки взрывопожарной опасности объектов топливно-энергетического комплекса, на которых производится и используется водород. Был выполнен анализ статистических данных об аварийности на объектах топливно-энергетического комплекса и подтверждена актуальность обеспечения взрывопожарной безопасности производства и обращения водорода на производственных объектах ТЭЦ. На основе анализа и сравнения отечественных и зарубежных методических и нормативных документов по оценке взрывопожарной опасности объектов водородной энергетики обоснована необходимость развития и дополнения отечественной нормативной базы в данной области. Проведен анализ статистических данных об авариях на объектах производства и использования водорода, полученных из официальной базы данных водородных инцидентов и аварий (HIAD 2.1), выполнен расчет частоты реализации аварийных событий для использования при оценке пожарных рисков на объектах получения и применения водорода. Сравнительный расчет по исходным данным частот возникновения аварийных ситуаций, принятых из нормативов и предлагаемым частотам, выполненный по типовым деревьям событий, показал, что разница между расчетными частотами результирующих событий, полученными при построении

дереьев событий развития аварий, находится в пределах от 76 % до 340 %, что свидетельствует о необходимости учета реальных статистических сведений на объектах производства и обращения водорода.

Вторая глава диссертации «Компьютерное моделирование процессов образования водородно-воздушной смеси при утечках водорода на производственных объектах ТЭЦ» Артем Леонидович приводит описание типового электролизного цеха на ТЭЦ, где происходит генерация водорода, технологическая схема и параметры эксплуатации оборудования. Рассмотрены отечественные и зарубежные пакеты программного обеспечения, предназначенные для анализа, оценки риска и проектирования систем безопасности на взрывопожароопасных объектах и было отмечено, что наиболее приемлемым является применение CFD-методами моделирования. Разработан метод моделирования аварийных утечек водорода с помощью полевого метода моделирования с использованием вычислительного процессора FDS и графического интерфейса PyroSim, реализующей математические модели физико-химических процессов диффузии водорода. Было определено, что максимальные значения концентраций водорода образуются под потолком, что подтверждает необходимость размещения датчиков в верхней зоне помещения. Показано, что естественная вентиляция в рассматриваемом режиме не обеспечивает достаточного разбавления водорода, что требует пересмотра действующих требований параметров воздухообмена в электролизных цехах, в частности необходимо обязательное оснащение постоянно действующей приточно-вытяжной вентиляцией. Разработанный метод моделирования может быть применен для обоснования обустройства вентиляционных систем на объектах генерации и транспортирования водорода, 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» соискатель описывает результаты экспериментальных исследований по образованию водородно-воздушных смесей при аварийной утечке водорода в ограниченном объеме помещения, имитирующего электролизный цех в уменьшенном масштабе. В экспериментах реализовано 5 режимов вентиляции различной кратности, воспроизводящие прямоточный, противоточный и перекрестно-точный характеры перемещения воздуха и водорода. 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. Диапазон значений D лежал в пределах от $(210...3650) \cdot 10^{-6}$ м²/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 для 5 режимов вентиляции; выявлены зависимости коэффициента диффузии водорода в верхней точке помещения от числа Рейнольдса для движения воздушных потоков для 5 режимов вентиляции.

Четвертая глава «Методика оценки взрывопожарной опасности производства и обращения водорода на производственных объектах ТЭЦ» посвящена построению критериальной модели оценки взрывопожарной опасности технологического оборудования объектов производства и обращения водорода. Предложено проводить определение уровня опасности посредством расчета показателей, характеризующих пожарную опасность водорода и сравнение их с допустимыми значениями критериев. В рамках критериальной модели предложена дифференциация технологического оборудования по потенциальной опасности, положенная в основу алгоритма оценки уровня взрывопожароопасности производства и обращения водорода на производственных объектах ТЭЦ. Произведена оценка степени значимости расчетных параметров методом экспертного опроса, было установлено, что наиболее значимым параметром оказалась скорость нарастания давления взрыва, наименее значимым предельная скорость срыва диффузионного факела. Оценка согласованности мнений экспертов показала удовлетворительные результаты. Проиллюстрирован алгоритм оценки уровня взрывопожароопасности производства и обращения водорода на производственных объектах ТЭЦ. Предложена методика оценки взрывопожарной опасности производства и обращения водорода на производственных объектах ТЭЦ, позволяющая на основе применения прогнозных значений динамики концентрации водорода, уточненных значений коэффициента диффузии водорода, коэффициента участия водорода взрыве повысит точность и достоверность расчетов при анализе и оценке пожарных рисков. В качестве рекомендации снижения взрывопожарной опасности производства и обращения водорода на производственных объектах ТЭЦ предложена система введения ингибирующего вещества в трубопровод транспортировки водорода. Автором показано, что применение методики позволило снизить взрывопожарную опасность на электролизных цехах ТЭЦ более чем в 2 раза и подтверждает это расчетами индивидуального пожарного риска.

В заключении работы подведены основные итоги исследования и сформулированы обобщающие выводы, подтверждающие гипотезу исследования.

Соискателем проведена положительная апробация результатов исследования на международных и всероссийских научных конференциях и в научных публикациях. Основное содержание и результаты выполненного Тимошенко А.Л. исследования нашли свое отражение в 15 научных работ, 5 из которых в рецензируемых научных изданиях из перечня ВАК при Министерстве науки и высшего образования Российской Федерации по соответствующей научной специальности и 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. Следовательно, перечень публикаций полностью отражает содержание и результаты проведенного диссертационного исследования.

Диссертация структурно организована и логически выстроена, что обеспечивает глубокое понимание исследовательского замысла и полученных результатов. Профессиональный язык изложения соответствует академическим стандартам. Оформление работы отвечает требованиям ГОСТ Р 7.0.11-2011. Содержание автореферата адекватно отражает основные положения и результаты диссертационной работы.

Содержание диссертации соответствует области исследований, указанных в п.6 и п.12 паспорта специальности 2.10.1. Пожарная безопасность (технические науки).

При общей положительной оценке диссертационного исследования следует отметить несколько **замечаний**:

Первое – результаты численного моделирования не сравниваются напрямую с реальными авариями или инцидентами, например, не проведено сопоставление с известными параметрами утечки или концентраций водорода в случаях, описанных в статистике инцидентов (ГРЭС, ТЭЦ и т. д.).

Второе – вызывают сомнения в эффективности предложенных мер (например, кратность воздухообмена $38,8-77,5 \text{ ч}^{-1}$) из-за их технической сложности и высокой стоимости реализации.

Третье – в формуле (1) для расчета частоты реализации аварийных событий на объектах водородной энергетики ($\lambda_{\text{ОПО}}$) не указано конкретное количество зарегистрированных опасных производственных объектов (ОПО), связанных с водородом ($N_{\text{ОПО}}$). Это снижает точность расчетов и достоверность полученных значений частот.

Высказанные выше замечания не носят принципиального характера, не снижают общей положительной оценки представленной к защите работы и могут рассматриваться как направления дальнейших исследований.

**Заключение о соответствии диссертации критериям, установленным
Положением о присуждении ученых степеней**

По своему содержанию текст диссертации на тему «Снижение взрывопожарной опасности в электролизных цехах ТЭЦ на основе прогнозирования образования водородно-воздушных смесей» представляет собой завершённый, самостоятельный научный труд, решающий важную задачу в области пожарной безопасности объектов водородной энергетики. Считаю, что диссертации соответствует критериям п.п. 9-11, 13, 14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 года № 842 «О порядке присуждения ученых степеней» (в действующей редакции), предъявляемым к диссертации на соискание ученой степени кандидата наук, а её автор, Тимошенко Артем Леонидович, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.10.1. Пожарная безопасность (технические науки).

Заместитель генерального директора
по техническому регулированию
АНО «Консорциум ПОПСБ»
доктор технических наук

Денис Михайлович Гордиенко

«01» 09 2025 года



Автономная некоммерческая организация в сфере поддержки отечественных производителей
«Консорциум «Производители охранных, пожарных, СКУД систем безопасности»

Адрес: 121471, г. Москва, ул. Рябиновая, д. 45А, стр. 24, помещение 4.

Телефон: +7 (916)111-00-37.

Адрес электронной почты: press@anopopsb.ru.

Сайт организации в сети «Интернет»: anopopsb.ru.