

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

кандидата технических наук Бугаева Петра Николаевича
на диссертацию Тимошенко Артема Леонидовича на тему
«Снижение взрывопожарной опасности в электролизных цехах ТЭЦ на основе
прогнозирования образования водородно-воздушных смесей»,
представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук
по специальности 2.10.1. Пожарная безопасность (технические науки)

Диссертационная работа А.Л. Тимошенко посвящена обеспечению пожарной безопасности электролизных цехов ТЭЦ, где вырабатывается водород. **Актуальность** данной работы обуславливается высокими показателями взрывопожарной опасности водорода при его использовании на энергетических объектах и значительным размером ущерба при авариях и взрывах водорода. Кроме того, важность данной тематики подтверждается реализацией Плана мероприятий по развитию водородной энергетики до 2024 года и утверждением Концепции развития до 2050 года, предусматривающей создание научно-технологической инфраструктуры, включая научные центры, инжиниринговые комплексы и испытательные полигоны. В связи с этим возникает необходимость разработки методов и средств организации превентивных мер для своевременного предотвращения образования взрывоопасных водородно-воздушных смесей при возникновении аварийных ситуаций.

Актуальность данной тематики приводит к необходимости решения **научной задачи**, заключающейся в научно-методическом обосновании обеспечения пожаро- и взрывобезопасности объектов энергетики, на которых в процессе электролиза вырабатывается водород.

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

Для достижения поставленной цели соискателем были поставлены и решены следующие **задачи**:

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 дозрывных 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.

На защиту диссертации Тимошенко А.Л. вынес три научных положения:

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 исследования состоит в том, что автором 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. Разработана математическая модель процесса образования газовой смеси в помещениях при аварийной утечке водорода, отличающаяся от существующих возможностью прогнозирования момента достижения локальных взрывоопасных концентраций с учетом влияния приточно-вытяжной вентиляции. 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. 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.

Теоретическую значимость исследования автор видит в дополнении информационно-справочной базы сведениями по частотам реализации аварийных событий при генерации, обращении и утилизации водорода для различных типов производственного оборудования и технологических процессов, расширяющей возможность формирования деревьев отказов и событий и применяемых в анализе и оценке пожарных рисков; получении коэффициентов диффузии водорода и коэффициентов участия водорода во взрыве, позволяющих прогнозировать образование локальных взрывоопасных концентраций водородно-воздушных смесей при утечках водорода в различных точках пространства вентилируемого помещения.

Практическое значение исследования А.Л. Тимошенко связано с применением критериальной модели, позволяющей 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; математическим моделированием аварийной утечки в вентилируемом помещении при производстве и обращении водорода, используемым в качестве обоснования рационального расположения газоанализаторов и аварийной вентиляции в помещениях, где обращается водород.

Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждается корректным применением апробированных научных методов исследования, проведением эксперимента с последующей статистической обработкой экспериментальных данных и согласованностью полученных результатов с данными других исследователей.

Тема работы и содержание исследований соответствуют области исследований, определяемой паспортом специальности 2.10.1 «Пожарная безопасность (технические науки)». В частности, работа соотносится с двумя пунктами паспорта специальности: **п. 6** «Исследование и разработка средств, методов и алгоритмов обеспечения пожаровзрывобезопасности технологических процессов и регламентных работ на стадии эксплуатации объектов защиты» и **п. 12** «Разработка научных основ создания систем, методов и технических средств обнаружения, предупреждения и ликвидации аварий, пожаров и взрывов».

Результаты диссертационной работы **внедрены** Башкирской Ассоциацией Экспертов при проведении экспертизы промышленной и пожарной безопасности на опасных производственных объектах; общества с ограниченной ответственностью «Груммант» (г. Санкт Петербург) в части проведения оценки взрывопожарной опасности технологического оборудования на участках генерации и хранения водорода; в практической деятельности Балаковской ТЭЦ-4 ПАО «Т Плюс» в части проведения мероприятий по снижению взрывопожарной опасности технологического оборудования электролизного цеха.

Перечень публикаций, в которых изложены основные положения диссертации, включает 15 позиций, 5 из них входят в Перечень ВАК при Министерстве науки и высшего образования Российской Федерации.

Общая характеристика структуры и содержания диссертации. Текст диссертационного исследования включает в себя введение, 4 главы, заключение, список литературы (185 наименований) и 7 приложений; содержит 160 страниц текста, 38 рисунков, 33 таблиц.

Структура диссертации хорошо продумана, логично выстроена и подчинена реализации цели работы. Выбранная структура позволяет решить корректно сформулированные в разделе «Введение» исследовательские задачи.

«**Введение**» содержит все основные элементы, необходимые для кандидатской диссертации: обоснование актуальности темы исследования; анализ степени изученности темы; формулировки научной задачи, объекта, предмета, цели и задач исследования; характеристика методологии исследования, его научной новизны; положения, выносимые на защиту; теоретическая и практическая значимость; апробация и реализация результатов исследования; публикации и личный вклад автора.

Глава 1 – «Анализ статистических данных по авариям и пожарам, обзор состояния научно-методической и нормативной базы в области пожарной безопасности на объектах водородной энергетики» содержит анализ научных, нормативно-технических и методических источников в области оценки взрывопожарной опасности объектов топливно-энергетического комплекса, на которых производится и используется водород. Автором был сделан вывод о необходимости развития нормативного и методического обеспечения в области взрывобезопасности электролизных цехов.

Глава 2 «Компьютерное моделирование процессов образования водородно-воздушной смеси при утечках водорода на производственных объектах ТЭЦ»

посвящена разработке метода 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.

В главе 3 – «Экспериментальное исследование процессов образования водородно-воздушной смеси при аварийных утечках водорода» приведены результаты экспериментальных исследований процессов образования водородно-воздушных смесей при аварийной утечке водорода в ограниченном объеме помещения, имитирующего электролизный цех в уменьшенном масштабе. По экспериментальным данным были определены коэффициенты диффузии водорода для различных режимов вентиляции и установлены зависимости от числа Рейнольдса.

Глава 4 «Методика оценки взрывопожарной опасности производства и обращения водорода на производственных объектах ТЭЦ» посвящена разработке на основе предлагаемых автором моделей и существующих методик оценки рисков аварий методики оценки взрывопожарной опасности объектов производства и обращения водорода. Была обоснована и разработана критериальная модель, позволяющая определять расчетные показатели взрывопожарной опасности (критерии) технологических участков, сравнивать их с допустимыми (предельными) значениями и относить их к определенной категории уровня взрывопожарной опасности. Соискателем были предложены практические рекомендации по снижению уровня пожарной опасности в электролизных цехах ТЭЦ при возникновении аварийных утечек водорода.

В заключении автором диссертации приведены обобщенные результаты исследования и выводы, которые логично завершают работу, полностью отражают суть проделанной работы, соответствуют поставленным задачам и позволяют судить о достижении цели исследования.

Не ставя под сомнение научные результаты, полученные соискателем, считаю необходимым отметить ряд **требующих пояснения вопросов**:

1. В диссертации не представлена информация об общем количестве опасных производственных объектов, на которых используется водород. Вместе с тем, при обращении к международной базе данных по авариям и инцидентам, связанных с водородом, существует возможность неполного учета происшествий, имевших место на территории Российской Федерации, что влияет на оценку частот реализации аварийных событий в сфере водородной энергетики, а также

сопоставление полученных результатов с частотами, регламентированными отечественными нормативными документами.

2. В ходе оценки адекватности полученной модели формирования водородно-воздушной смеси для согласования с экспериментом были использованы поправочные коэффициенты $k_1=2$ (для интервала $t=0-170$ с) и $k_2=4$ (для интервала $t=170-300$ с). Однако экспериментальные данные охватывают только диапазон $t=0-150$ с, в связи с чем неясно, каким образом был определён коэффициент k_2 для временного диапазона, выходящего за пределы эксперимента.

3. На мой взгляд в методике оценки взрывопожарной опасности объектов производства и обращения водорода целесообразно уточнить критические значения допустимых показателей. При использовании бинарной схемы (0 при нормативном значении и 1 при превышении) большинство показателей при штатном режиме фиксируются как «0», что не позволяет в полной мере различать уровни опасности для объектов с однотипным оборудованием. Высокий уровень устанавливается фактически только после выхода показателей за нормативы, то есть уже после наступления аварийной ситуации.

4. Расчеты, показывающие, что одна из предложенных рекомендаций, внедрение системы аварийной вентиляции, позволяет достичь значительного снижения индивидуального пожарного риска — с $2,8 \cdot 10^{-6}$ до $5,4 \cdot 10^{-8}$, то есть более чем в 50 раз. Однако вывод о снижении взрывопожарной опасности «более чем в 2 раза» не отражает действительного масштаба эффективности данной меры. Кроме того, обоснование выбора высокой кратности воздухообмена ($n=35$) в качестве оптимальной представлено неполно и не рассматривает сложности ее практической реализации. Нормативное значение пожарного риска для производственных объектов по 123-ФЗ составляет 10^{-6} . Учитывая значительный запас по эффективности, целесообразно найти приемлемое, технически осуществимое значение кратности при сохранении требуемого уровня безопасности.

Данные замечания не носят принципиального характера и не влияют на общую положительную оценку диссертационной работы.

Заключение

Вышеизложенное позволяет сделать вывод о том, что диссертационная работа Тимошенко А.Л. на тему «Снижение взрывопожарной опасности в

электролизных цехах ТЭЦ на основе прогнозирования образования водородно-воздушных смесей» является завершенным научно-квалификационным исследованием, и соответствует критериям пп. 9-11, 13, 14 Положения о присуждении ученых степеней» утвержденного постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 года № 842 «О порядке присуждения ученых степеней», предъявляемым к диссертации на соискание ученой степени кандидата наук.

Считаю, что автор исследования – Тимошенко Артем Леонидович за решение научной задачи, имеющей существенное значение для развитие методов обеспечения пожаро- и взрывобезопасности объектов водородной энергетики, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.10.1. Пожарная безопасность (технические науки).

Официальный оппонент:

Ассистент кафедры промышленной
безопасности и охраны окружающей среды

РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина

кандидат технических наук

«29» августа 2025 года

Личную подпись Бугаева П. Н. заверяю



Бугаев Петр Николаевич



Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина»

Адрес: 119296, г. Москва, пр-кт Ленинский, д. 65, к. 1.

Телефон: +7 (499) 507-88-88.

Адрес электронной почты: com@gubkin.ru, www.gubkin.ru.

РГУ нефти и газа (НИУ)
имени И.М. Губкина
Рег. № 70/1257
от «01» 09 2025 г.