

ПРОБЛЕМЫ НОРМАТИВНОГО, ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО И РАСЧЕТНО-ТЕОРЕТИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ВОДОРОДНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

© 2020 г. И. А. Кириллов^{1,*}, В. А. Симоненко², Н. Л. Харитонова³

¹ Национальный исследовательский центр “Курчатовский институт”, Москва, Россия

² Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики им. Забабахина, Снежинск, Россия

³ Научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности, Москва, Россия

*E-mail: Kirillov_IA@nrcki.ru

Поступила в редакцию 09.06.2020 г.

После доработки 09.06.2020 г.

Принята к публикации 20.07.2020 г.

Для формирования и развития водородной энергетики (ВЭ) в качестве технологически эффективной и конкурентоспособной части будущего с безуглеродным или малоуглеродным экономическим укладом необходимо преодолеть большое количество препятствий, связанных не только со зрелостью и доступностью технологий, их экономической эффективностью, но и с достаточным (приемлемым для общества) уровнем безопасности ВЭ. Даже при решении большинства технологических и экономических проблем скорость промышленного и коммерческого освоения научно-технических разработок в области ВЭ может лимитироваться уровнем комплексного (аналитического, расчетно-теоретического, экспериментального) научно-технического обеспечения безопасности систем, объектов и сетей ВЭ на всем жизненном цикле (от проектирования до вывода из эксплуатации), полнотой и достаточностью нормативно-правовой базы как для новых реакторных комплексов и сопутствующих им новых технологий, так и для систем безопасности инфраструктуры ВЭ. Сформулированы и кратко описаны три класса взаимосвязанных проблем в расчетно-теоретическом, экспериментальном и нормативно-правовом обеспечении безопасности ВЭ. Их своевременное решение критически важно для успешного перехода к безуглеродному технологическому укладу.

DOI: 10.1134/S1992722320030061

ВВЕДЕНИЕ

В ближайшее десятилетие ожидается резкий рост спроса на водород – как эффективный энергоноситель (средство аккумулирования, транспорта и использования энергии). Предполагается, что основными “двигателями” роста потребления крупномасштабного водорода будут транспорт (морской, железнодорожный, автомобильный, авиационный), системы рассредоточенного комбинированного (тепло + электричество) энергообеспечения в промышленности и жилищно-коммунальном хозяйстве.

Как отмечалось в пионерских [1] и последующих обзорных работах [2] – “сфера применения водородной энергетики (ВЭ) – “downstream” (вниз по энергопотoku от источника энергии), т.е. транспортировка, переработка и использование энергии, но не “upstream” (добыча первичного энергосырья). Водородная энергетика лишь дополняет нефтяную, атомную или “возобновляемую” (солнечную, ветровую) энергетiku, но са-

ма по себе не является новым источником энергии. Другими словами, водородная энергетика – это способ наиболее эффективного применения имеющихся источников энергии, повышения КПД их использования, повышения экологичности или получения иных преимуществ” (рис. 1).

Переход от углеродной к ВЭ в Российской Федерации планируется осуществлять на основе двух взаимодополняющих технологий – технологий атомно-водородной энергетики (атомных энерготехнологических станций (АЭС)) и технологий возобновляемых источников энергии, использующих энергию солнца, ветра, воды.

Двухкомпонентный подход позволит:

– создать новый рынок для атомной отрасли – сферу промышленного теплоснабжения, потребляющего более 40% органического топлива;

– сэкономить природный газ и нефть, используя их как сырье для различных видов промышленности с высоким уровнем передела. Сейчас его крупнотоннажное производство осуществля-



Рис. 1. Области применения водородных топливных элементов [2].

ется в основном путем паровой конверсии природного газа — метана. При этом сжигается около половины исходного газа, а продукты его сгорания выбрасываются в атмосферу. Использование атомной энергии может существенно повысить экологичность крупнотоннажного производства водорода и эффективность использования исходного сырья — природного газа или других углеводородов;

— повысить энергетическую и экономическую безопасность страны за счет производства экологически чистого водородного топлива из воды. Потребности и потенциальный рынок водорода сравнимы в энергетическом эквиваленте с электроэнергией. Это востребованный товар для внутреннего и зарубежного рынков;

— снизить выбросы в окружающую среду вредных веществ, включая парниковые газы. В частности, ужесточаются требования к качеству воздуха: ВОЗ уже перенесла пары дизельного топлива из категории “возможного канцерогена” (группа 2а), куда они были определены в 1989 г., в категорию “канцероген” (группа 1);

— утвердить Россию в статусе мирового лидера в области технологий атомной энергетики.

Системное (экспериментальное, расчетно-теоретическое, аналитическое и нормативное) научно-техническое обеспечение безопасного развития, становления и функционирования ВЭ необходимо для эффективного, социально и экологически благоприятного удовлетворения за-

просов экономики и общества Российской Федерации.

Даже при решении всех существующих технологических и экономических проблем ВЭ ее конкурентоспособность и место в будущей безуглеродной экономике будут определяться уровнем безопасности.

Уязвимым звеном может стать как инновационная АЭС с химико-технологической частью (ХТЧ) для производства водорода, так и инфраструктура ВЭ — сети транспортировки, распределения и хранения, а также системы использования водорода, контактирующие с массовым потребителем, который не обладает культурой безопасности, выработанной в атомной промышленности.

Безопасность ВЭ необходимо:

— обеспечивать системой мер (аналитических, расчетных, технических, технологических, нормативных, организационных),

— нацеливать на эшелонированную защиту самих технических систем, персонала и массовых потребителей от возможных опасных воздействий,

— основывать на риск-информированном управлении безопасностью и стойкостью (функциональной устойчивостью),

— развивать с учетом возможных, в том числе опасных, воздействий людей, технических и физических систем, а также кибер-информационных

сетей, обеспечивающих управление компонентами и подсистемами ВЭ – от крупнотоннажных и мелкомасштабных производителей водорода через системы водородной логистики (локализованные и протяженные) до крупных, мелкомасштабных и бытовых потребителей водорода.

В настоящее время ВЭ в большинстве промышленно развитых стран рассматривается как инновационная область. По этой причине скорость промышленного и коммерческого применения научно-технических разработок будет лимитироваться качеством и уровнем стандартизации не только с точки зрения зрелости технологий и технических систем, но и с точки зрения обеспечения безопасности на всем жизненном цикле ВЭ.

Цель настоящей работы – сформулировать и кратко описать три класса взаимосвязанных проблем в расчетно-теоретическом, экспериментальном и нормативном обеспечении безопасности водородной энергетики, которые не отражены или недостаточно полно описаны в более ранних европейских [3] и американских [4] обзорах. Своевременное решение выявленных проблем критически важно для успешного перехода к безуглеродному технологическому укладу.

Несмотря на то что пионерские, интенсивные и широкомасштабные работы по безопасности водорода как топлива и энергоносителя проводились в Советском Союзе и США с конца 1950-х годов в рамках развития ракетно-космических технологий, с конца 1970-х в рамках развития атомно-водородной энергетики, а с конца 1980-х в рамках работ по повышению водородной безопасности АЭС с ВВЭР (водо-водяной энергетический реактор), в настоящее время назрела необходимость в пересмотре и уточнении полученных знаний, технологий и опыта эксплуатации технических систем, в которых обращается водород. Применимость отраслевых норм и правил, разработанных в условиях малых ресурсных ограничений (авиация, космос, специальные применения), имеет существенные ограничения для массового применения водорода как коммерческого продукта массового применения.

В данной работе кратко описаны:

- ключевые проблемы нормативного обеспечения безопасности ВЭ, которые целесообразно учитывать при уточнении существующих или разработке новых отечественных федеральных и отраслевых норм и правил безопасности ВЭ;

- экспериментальные данные, необходимые для экспериментального обоснования новых и/или уточненных действующих норм и стандартов, для которых существующий научно-технический задел не удовлетворяет современным требованиям;

- аналитические инструменты (концептуальные схемы анализа и проектирования безопасности, а также модели опасных природных, технологических или управленческих процессов) для обоснования, оценки, управления и непрерывного повышения безопасности ВЭ.

НОРМАТИВНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ВОДОРОДНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

В основу современных систем нормативного регулирования безопасности положены два базовых концептуальных подхода – целеориентированный (ЦОП) и риск-информированный (РИП) подход.

Целеориентированный¹ (*performance-based*) подход [5, 6] к техническому регулированию в основу принятия решения закладывает требования к цели (*goal*) технической системы или параметрам ее функционирования (*performance*) и его результатам (*results*).

Целеориентированный подход сфокусирован, в первую очередь, на результат инцидента (последствия аварии) или функциональную цель, поставленную для технической системы, а не на процесс или метод обеспечения безопасности. Поскольку он имеет дело с количественными показателями (*indicators*), то позволяет легко отслеживать отклонения от нормы (или среднего) и фокусировать внимание и ресурсы на тех элементах системы или процессов, которые могут стать источником риска.

Целеориентированный подход может быть реализован без понимания рисков (*risk insights*). Даже в этом случае он предоставляет существенное “окно возможностей” для соответствия установленным критериям функционирования. Поскольку не всегда возможно установить объективный измеримый критерий функционирования/эксплуатации, то для некоторых применений использование целеориентированного подхода невозможно.

Риск-информированный подход [7, 8] – подход, при котором решение (политическое, экономическое, техническое) принимается с использованием как детерминистских, так и вероятностных аспектов проблемы с целью сконцентрировать внимание заинтересованных сторон, участвующих в принятии решений, на тех опасных процессах и условиях, которые в наибольшей степени влияют на величину риска.

Например, при решении проблем безопасности в атомной энергетике под РИП понимается подход, который использует результаты вероят-

¹ Термины “целеориентированный” концептуальный подход (*performance based framework*) и “подход, ориентированный на результат” (*goal-based framework*) будут использоваться как синонимы.

ностного анализа безопасности в сочетании с детерминистским анализом безопасности для того, чтобы сфокусировать внимание эксплуатирующих организаций атомных станций (АС) и организаций, выполняющих работы и предоставляющих услуги эксплуатирующим организациям АС, а также специалистов Ростехнадзора при осуществлении ими лицензионной (разрешительной) деятельности или федерального государственного надзора в области использования атомной энергии на проблемах, которые влияют на безопасность. Риск-информированный подход включает в себя (как составную часть) риск-информированное принятие решений (*risk-informed decision making*) – способ принятия решений, при котором используются как детерминистские, так и вероятностные аспекты проблемы.

Риск-информированный подход к анализу безопасности расширяет возможности “детерминистского” подхода за счет:

- явного рассмотрения более широкого набора угроз безопасности,
- предоставления конкретных логических средств для расстановки приоритетов на основе значимости риска, опыта эксплуатации и/или инженерных решений,
- облегчения рассмотрения более широкого спектра ресурсов, которые могут нейтрализовать опасности/угрозы,
- явной идентификации и количественного описания неопределенностей в анализе безопасности,
- повышения качества управленческих решений путем использования анализа чувствительности результатов к исходным предположениям и анализа неопределенностей в исходных данных и в расчетах на прочность и устойчивость зданий.

Указанные особенности РИП позволяют, с одной стороны, снизить в некоторых случаях степень необоснованного консерватизма “детерминистского” подхода, а с другой стороны, дают методологическую основу для формулировки дополнительных требований к конструкции несущих конструкций, которые позволяют снизить затраты на обеспечение требуемого уровня безопасности экономически эффективным способом.

Использование величины риска в качестве метрики (т.е. измеримого масштаба) уровня безопасности несущих конструкций фокусирует внимание проектировщика именно на тех компонентах системы, которые вносят наибольший вклад в величину риска. Это дает возможность размещать доступные ресурсы именно на критически важных элементах защиты и “смягчать” требования к элементам или компонентам, кото-

рые не вносят значительного вклада в величину риска.

Несмотря на то что “детерминистский” подход был успешным в обеспечении безопасности сложных технических систем на большом интервале времени, существуют возможности для улучшения.

Системное и систематическое применение РИП дает возможность улучшения путем более явного анализа рисков и включения понимания рисков в практику проектирования, эксплуатации и надзора за безопасностью несущих конструкций.

Соотношение между “детерминистским” и “риск-информированным” подходами схематически показано на рис. 2 и 3. В отличие от доминирующего сегодня “предписывающего” подхода в рамках РИП наряду с результатами инженерного анализа явно принимается во внимание информация о результатах анализа рисков, связанных с опасным/защищаемым производственным объектом или технологией.

Риск-информированный подход позволяет, с одной стороны, более реалистично (по сравнению с “предписывающим” подходом, который зачастую использует так называемые “консервативные предположения²” – предположения о наихудшем развитии событий), а с другой стороны, в количественной форме соотносить риск с преимуществами того или иного технического решения.

Разработку концепции нормативного обеспечения безопасности ВЭ необходимо проводить как с учетом описанных выше тенденций, которые четко прослеживаются в зарубежной [9–11] и отечественной [12, 13] практике нормативного обоснования безопасности, так и новых тенденций научных результатов, концептуальных подходов и лучших практик обеспечения безопасности сложных, в том числе сетевых технических систем.

Применительно к нормативному регулированию атомно-водородной энергетики следует отметить, что согласно концепции развития ВЭ в Российской Федерации атомно-водородная энергетика для крупномасштабного производства и потребления водорода будет включать в себя реакторную установку (рассматривается применение высокотемпературного газоохлаждаемого реактора), ХТЧ для производства водорода, объединенных в АЭТС.

В соответствии со статьей 3 Федерального закона об использовании атомной энергии № 170-

² Термин из теории обеспечения безопасности систем высокой ответственности – ядерной энергетики, топливной энергетике (нефть, газ), аэрокосмической промышленности.

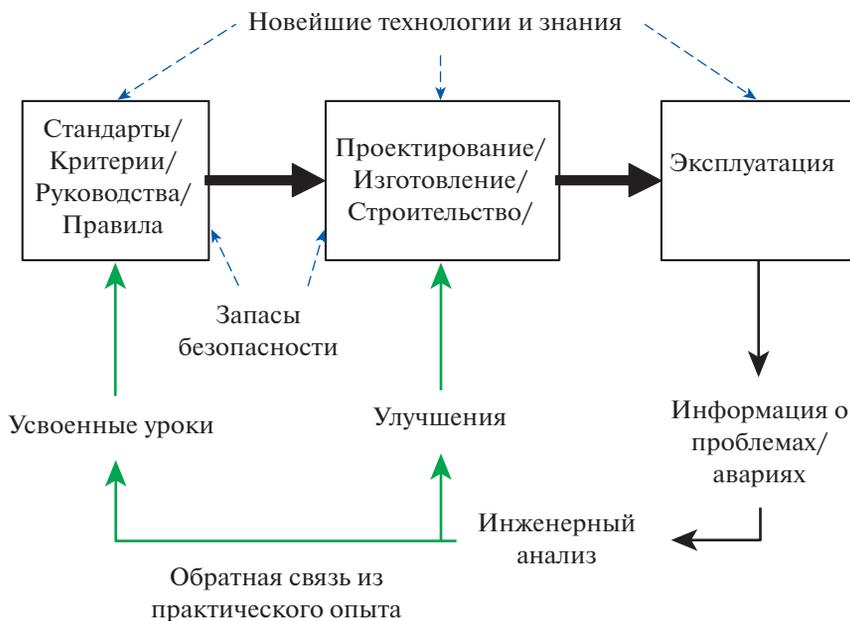


Рис. 2. Схема детерминистского подхода к обеспечению безопасности.



Рис. 3. Схема риск-информированного подхода к обеспечению безопасности.

ФЗ АЭТС являются объектами использования атомной энергии и в соответствии со статьей 6 № 70-ФЗ требования к обеспечению безопасности таких объектов должны устанавливаться в федеральных нормах и правилах в области использования атомной энергии.

Поэтому в документах нормативного регулирования для АЭТС должны устанавливаться тре-

бования не только к обеспечению водородной взрывобезопасности на объекте, но и к безопасности объекта и деятельности в области использования атомной энергии (ядерной и радиационной безопасности).

До настоящего времени в Российской Федерации регулирования безопасности в области использования атомной энергии в отношении

АЭС, высокотемпературных газовых реакторов, ХТЧ и их совместного функционирования не осуществлялось. Конструктивные особенности АЭС могут привести к тому, что часть действующих требований по обеспечению безопасности атомных станций будет неприменима к данным станциям. Поэтому для установления целей и основных критериев безопасности АЭС, а также основных принципов и общих требований к техническим и организационным мерам, направленным на достижение безопасности, а также для эффективного регулирования безопасности таких станций могут потребоваться разработка и утверждение целого комплекса федеральных норм и правил в области использования атомной энергии.

Разработка норм и правил по обеспечению функционирования и безопасности атомно-водородной энергетики должна включать в себя следующие этапы:

- формирование перечня нормативно-правовой разрешительной документации, распространяющейся и подлежащей анализу применительно к атомно-водородной энергетике для крупномасштабного производства и потребления водорода;

- анализ действующих федеральных норм и правил применительно к атомно-водородной энергетике для крупномасштабного производства и потребления водорода;

- формирование перечня отдельных положений правил ядерной безопасности и общих положений безопасности для реакторных установок АС, подлежащих включению в документацию для атомно-водородной энергетики.

В качестве первоочередных задач целесообразно рассматривать следующие этапы нормотворческой деятельности:

- оценка полноты и достаточности нормативно-правовой базы и подготовка проектов по внесению изменений в действующие нормативно-правовые акты Российской Федерации, а при необходимости разработка новых требований к обеспечению безопасности новых реакторных комплексов и сопутствующих им новых технологий атомно-водородной энергетики;

- разработка концепции основных положений обеспечения безопасности при производстве, хранении и транспортировке водорода на АЭС;

- разработка концепции безопасности и функциональной устойчивости ВЭ;

- разработка и введение в действие федеральных норм и правил “Основные положения обеспечения безопасности при производстве, хранении и транспортировке водорода на атомной энерготехнологической станции”.

Для разработки и уточнения отечественных норм и стандартов обеспечения безопасности ВЭ необходимо подготовить:

- первичные научно-технические данные – экспериментальные данные по опасным факторам горения и взрыва водорода в аварийных условиях, лучшие эмпирические практики обеспечения водородной безопасности,

- инструменты для анализа рисков и стойкости – методики и программные средства для детерминистского и вероятностного анализа безопасности,

- работоспособные образцы (действующие макеты) технических систем водородной пожарной и взрывозащиты – системы мониторинга взрывоопасных смесей, системы беспламенного удаления водорода (пассивные каталитические рекомбинаторы водорода), системы инертизации объектов и устройств инертными газами, химическими флегматизаторами, водяным паром, системы вентиляции и т.д., учитывающие особенности процессов распространения и горения водорода и специфику объектов ВЭ и технических изделий и устройств, обеспечивающих безопасное производство, транспорт, хранение, распределение и использование водорода как энергоносителя и массового продукта потребления.

Ниже кратко описаны приоритеты для экспериментальных и расчетно-теоретических исследований, которые необходимы для создания полноценного корпуса нормативных документов по безопасности инфраструктуры ВЭ.

НОВЫЕ И УТОЧНЕННЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ

В различных отраслях промышленности, в которых обращается или может образовываться водород (газовой, нефтехимической, химической, металлургической, стекольной, пищевой), в углеводородном топливно-энергетическом комплексе, в атомной энергетике, в авиакосмической отрасли накоплен значительный объем знаний, инструментов, технологий и устройств для обеспечения водородной безопасности. Однако во всех перечисленных выше случаях обращение водорода происходило внутри промышленных систем, в которых достигнут определенный уровень культуры безопасности обученного персонала и для которых разработаны и внедрены отраслевые или корпоративные системы управления промышленной безопасностью.

Для того чтобы минимизировать нормативные барьеры для согласования разрабатываемого комплекса норм и стандартов по водородной безопасности с актуальными и разрабатываемыми международными системами нормативного обеспечения безопасности инфраструктуры ВЭ и

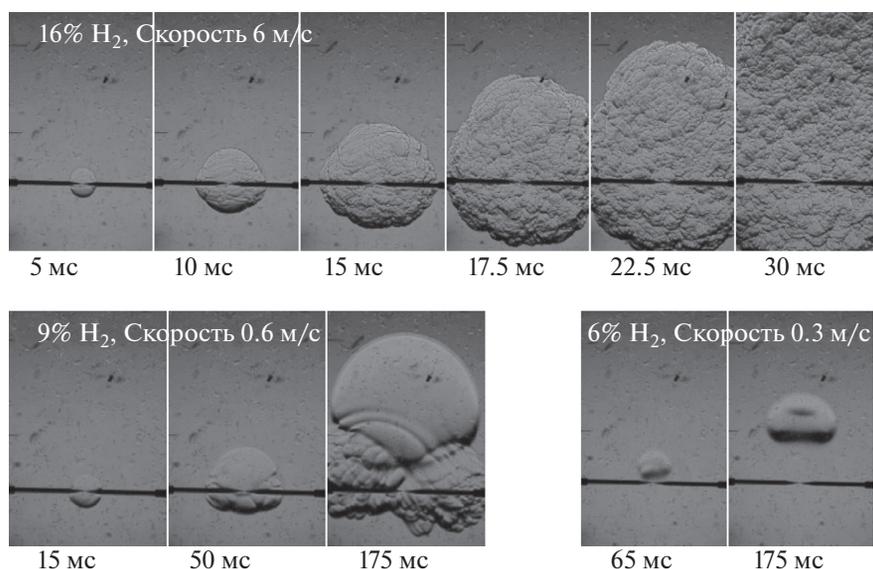


Рис. 4. Характерный вид низкоскоростных пламен в ультрабедных (от 4 до 16 об. % H_2) водородно-воздушных смесях [15].

транспорта, нужны новые и уточненные экспериментальные данные.

Для комплексного обеспечения безопасности ВЭ, включающей в себя АЭТС с высокотемпературным газоохлаждаемым реактором и ХТЧ для производства водорода, а также инфраструктуру для транспорта, хранения, распределения и использования водорода, необходимы первичные научно-технические данные – экспериментальные данные по опасным факторам горения и взрыва водорода в аварийных условиях, лучшие эмпирические и аналитические практики обеспечения водородной безопасности (*best practices*), в том числе данные для верификации и валидации компьютерных кодов, предназначенных для расчетного обоснования пожаро- и взрывобезопасности.

В настоящее время наибольшую актуальность представляют следующие направления экспериментальных исследований.

Горение ультрабедных водородсодержащих газовых смесей

Переход от шаровых к дефлаграционным пламенам. В отличие от углеводородных топлив газовые смеси водорода с воздухом горят принципиально разным образом в зависимости от начальной концентрации водорода в смеси. В ультрабедных смесях (с концентрацией менее 10 об. % H_2) пламя не может существовать в виде непрерывного фронта (как в дефлаграционных пламенах в околостехиометрических и богатых смесях) и самофрагментируется на небольшие очаги горения, имеющие вид “пузырьков” или “шаровых пла-

мен” и всплывающие вверх из-за эффектов плавучести [14].

Несмотря на значительные усилия, направленные на выяснение особенностей горения ультрабедных водородо-воздушных смесей, их природа и опасные характеристики изучены еще недостаточно полно. Недостаток знаний об ультрабедном горении водорода проявляется в отсутствие в настоящее время консенсуса при ответе на вопрос – при какой минимальной концентрации водорода в смеси возможно воспламенение или взрыв? В настоящее время в качестве критериев используются различные численные значения – 2, 4, 8, 10 об. % H_2 . Для того чтобы обоснованно ответить на указанный и другие подобные вопросы об опасности горения ультрабедных водородно-воздушных смесей, необходимы дополнительные эксперименты, нацеленные на исследование характеристик всплывающих шароподобных пламен и их переход в дефлаграционные пламена (рис. 4).

Распространение водородо-воздушных пламен в узких каналах. Непротиворечивое и научно обоснованное определение нижнего концентрационного предела для взрывов водородно-воздушных смесей, способных оказывать опасное барическое воздействие, в настоящее время отсутствует. В научной, проектно-конструкторской и нормативной литературе используется несколько значений концентрации водорода, характеризующих концентрационные пределы для различных физико-химических процессов (воспламенение/зажигание, ускорения пламен, детонация).

Экспериментальное исследование околокри- тических процессов горения в условиях земной

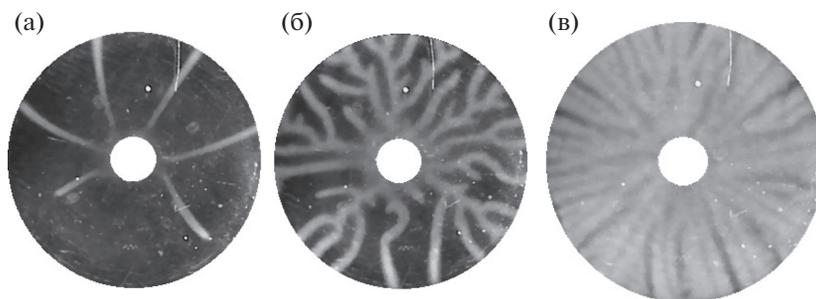


Рис. 5. Три характерных морфотипа для двумерного распространения ультрабедного водородно-воздушного пламени в узких плоских горизонтальных каналах: а – “лучистый”, б – “дендритный”, в – “квазиоднородный” [16].

тяжести затруднено эффектами плавучести водородно-воздушных смесей.

Для того чтобы минимизировать влияние силы тяжести на распространение пламен [16], была сконструирована и запатентована [17] специализированная закрытая ячейка Хеле–Шоу, в которой, с одной стороны, затруднены конвекционные процессы в газовой смеси, а с другой стороны, тепловые потери из фронта пламени позволяют исследовать свободное распространение фронтов горения практически во всем диапазоне горючести водородно-воздушных смесей.

Цель данных экспериментов – визуально исследовать основные глобальные (на характерном масштабе экспериментального объема) морфологические особенности свободного двумерного распространения волн горения в закрытой горизонтальной ячейке Хеле–Шоу в ультрабедных (от 4 до 12 об. % H_2) водородно-воздушных газовых смесях.

В исследуемом диапазоне химических составов были обнаружены (рис. 5) три характерных морфотипа для свободного двумерного распространения пламени: “квазинепрерывный”, “дендритный”, “лучеобразный”.

При последовательном снижении концентрации водорода в смеси были зафиксированы два скачкообразных перехода для глобальной морфологии фронта горения. Первый морфологический переход (“непрерывное–дендритное” горение) происходит в диапазоне концентраций 8.0–9.0 об. % H_2 . Второй переход (“дендритное–лучеобразное” горение) происходит при концентрации 7.0–7.1 об. % H_2 . Внутри каждого из трех обнаруженных диапазонов для фиксированной концентрации водорода в смеси в серии экспериментов глобальная морфология (форма и характерные размеры) фронта горения сохраняется, а направление движения основных “ветвей” или “лучей” меняется стохастически.

Развитие данного научного направления необходимо для получения первичных экспериментальных данных по взрывобезопасности водород-

ных топливных элементов, которые состоят из большого количества плоских электродов, образующих узкие каналы, и для выяснения механизмов перехода от квазиизобарических шароподобных пламен к дефлаграционным пламенам, способным эффективно ускоряться и переходить в квазидетонационный режим горения.

Распространение и ускорение дефлаграционных пламен в стратифицированных водородно-воздушных газовых смесях

Классический подход к нормативному обеспечению водородной безопасности базируется на двух предположениях:

- исходная смесь перемешана и характеризуется пространственно однородным химическим составом (во всех точках локальные концентрации совпадают и могут характеризоваться единым значением (средним по измеряемому объему));

- свойства горючей непрореагировавшей смеси не изменяются (инвариантны) во времени, т.е. не учитывается динамика изменения градиентов пространственно неоднородного поля концентрации.

Многочисленные экспериментальные и расчетно-теоретические исследования процессов горения, а также анализ аварии на АЭС Фукусима показали, что:

- в аварийных условиях водородо-воздушная смесь может быть сильно стратифицирована и ее влияние на динамику пламен существенно,

- использование для оценки взрывобезопасности только концентрационных пределов смеси (диаграммы Шапиро–Моффетти) не позволяет учесть свойства ограничивающего или замыкающего пространства;

- в настоящее время все измеряемые показатели и критерии взрывоопасности установлены только для предварительно перемешанных, пространственно однородных по химическому составу пароводородно-воздушных смесей [18];

– результаты независимых экспериментальных исследований [19, 20] условий перехода горения в детонацию в закрытых каналах, в которых формировалось одномерное стратифицированное распределение водорода, показали, что:

– известные критерии ускорения пламени, полученные для пространственно однородных смесей, не учитывают эффект неоднородности и не обеспечивают консервативности для оценок взрывоопасности;

– градиенты концентрации приводят к значительному ускорению пламени в незагроможденных каналах;

– в загроможденных каналах градиенты концентрации могут как ускорять, так и замедлять переход к детонации в зависимости от средней концентрации водорода.

Экспериментальные и расчетно-теоретические исследования влияния стратификации на переход горения в детонацию находятся в начальной стадии. Их развитие необходимо для обоснованного анализа, оценки и обеспечения водородной взрывобезопасности.

Формирование взрывоопасных облаков при аварийном истечении жидкого водорода

При крупномасштабном производстве и транспортировке водорода его обращение в виде криогенной жидкости имеет ряд преимуществ [21, 22]. Несмотря на большой объем знаний по безопасности жидкого водорода, который был получен в аэрокосмических приложениях в Российской Федерации [23] и США [24], для безопасного проектирования и эксплуатации той части инфраструктуры ВЭ, в которой будет обращаться жидкий водород, необходимы дополнительные экспериментальные и расчетно-теоретические исследования опасностей, характерных для криогенного водорода.

АНАЛИТИЧЕСКИЕ ИНСТРУМЕНТЫ ДЛЯ АНАЛИЗА И ПРОЕКТИРОВАНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ВОДОРОДНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

Для комплексного обеспечения безопасности развиваемой ВЭ полученный ранее научно-технический задел необходимо использовать с учетом следующих важных факторов:

– при строительстве новых объектов инфраструктуры ВЭ на территориях с плотной застройкой или с высокой плотностью населения (основной потребитель водорода) необходимо учитывать риски, известные из практики управления промышленной безопасностью опасных объектов инфраструктуры ВЭ (трубопроводов, криорезервуаров и сосудов высокого давления для хра-

нения водорода в различных отраслях промышленности), но расположенных, как правило, на значительных (безопасных) расстояниях от мест скопления населения,

– безопасность, надежность и стойкость (функциональная устойчивость) инфраструктуры ВЭ должны быть существенно выше достигнутого сегодня уровня в промышленности и энергетике для того, чтобы массовый потребитель водорода, не обладающий достаточной культурой безопасности, был защищен от возможных водородных инцидентов и аварий и сам не мог стать источником неприемлемых рисков,

– для атомно-водородной энергетики, где два опасных объекта – ядерный реактор и ХТЧ – будут находиться в прямом производственном, технологическом и управленческом взаимодействии, необходимо учитывать малоисследованные риски, связанные с взаимным влиянием ядерных/радиационных процессов и опасных химических процессов, а также факторов наличия пожаро- и взрывоопасных смесей водорода с метаном и монооксидом углерода в диапазоне условий, характерных для установок ХТЧ.

Для адекватного учета перечисленных выше особенностей комплексного обеспечения безопасности развиваемой ВЭ в настоящее время представляется важным приоритетное развитие следующих аналитических инструментов.

Методики анализа риска каскадных аварий

Наиболее тяжелые по последствиям техногенные аварии, как правило, происходят по каскадным сценариям, когда опасное природное явление, авария и/или отказ одного элемента приводит к отказам и/или авариям других элементов системы [25–27].

Природные стихийные бедствия во многих случаях также сопровождаются каскадным развитием техногенных аварий. Одним из ярких примеров каскадного развития событий явилось сильное землетрясение 2011 г. в Японии, вызвавшее волну цунами, которая явилась основной причиной крупной аварии с выходом радиоактивных веществ в окружающую среду на АЭС “Фукусима-1”. Подобные аварии в различных научно-технических источниках называют “каскадными авариями”, “авариями с эскалацией масштабов последствий” или “эффектом домино”.

Каскадная авария, вызванная стихийным бедствием или техногенным инцидентом, представляет собой наиболее сложный вариант развития событий с точки зрения оценки безопасности систем, аварийного планирования и реагирования. Поэтому интерес к проблемам “эффекта домино”, “каскадного развития аварии” и т.д. посто-

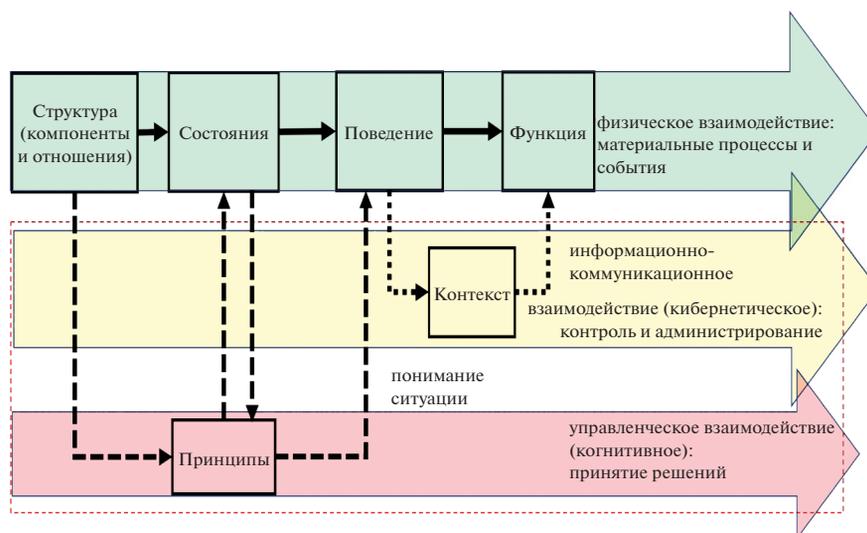


Рис. 6. Обобщенная модель аварии с учетом трех (физических, информационных, когнитивных) базовых взаимодействий в сложных социотехнических системах [39].

янно растет в научной литературе и нормативных документах.

В настоящее время при оценке безопасности опасных производственных объектов в мировой практике и практике России на нормативном уровне требуется проведение анализа каскадного развития аварий [28–31]. В перечисленных документах и методиках в основном декларируется необходимость рассматривать взаимосвязи между блоками объекта, связанные с воздействием поражающих факторов на аварийном блоке на соседние блоки и объекты, содержащие опасные вещества. Однако пригодные к непосредственному практическому использованию методики анализа рисков каскадных аварий отсутствуют, поскольку данное научное направление находится в стадии становления и в последнее десятилетие характеризуется бурным развитием [32–35].

Нелинейные модели аварии

Снижение риска каскадных и системных аварий является одним из наиболее перспективных методов комплексного обеспечения безопасности сложных социотехнических систем. Водородная энергетика, несомненно, является одним из примеров таких сложных социотехнических систем. Для анализа рисков каскадных аварий и на его основе для анализа стойкости сложных социотехнических систем необходимы реалистичные модели каскадных аварий.

В настоящее время для обеспечения комплексной безопасности (различных аспектов ядерной, радиационной, пожаро-, взрыво-, химической, биологической, экологической) при анализе риска тяжелых аварий (подготовке пас-

портов безопасности, обосновании безопасности промышленной площадки или объекта) и при выработке организационно-технических мероприятий по управлению техногенными, и природными рисками (подготовке планов эвакуации и т.д.) неявно используется так называемая “линейная модель аварии”, в которой авария представляет собой цепочку (граф) событий от “опасности/угрозы” через “инициирующее событие” до “ущерба”.

На концептуальную ограниченность линейной модели аварии впервые было указано в классической работе [36], где началась методологическая разработка реалистичных, “нелинейных” моделей аварии, которые учитывали бы не только материальные, но и организационные и социальные факторы, определяющие или способствующие реализации тяжелых аварий [37, 38].

В [39] предложено расширение нелинейной модели Расмуссена–Левисон–Йоханссона для каскадных аварий, которое помимо структурных и функциональных особенностей взаимодействия систем явно учитывает их поведенческие (процессные) характеристики (рис. 6).

Предложенная модель включает в себя два новых элемента – для реалистичного моделирования инициирования, эскалации, распространения и затухания каскадных аварий помимо стандартных моделей “структура–функция” указано на необходимость:

– разработки четырех дополнительных моделей – “состояние”, “процесс”, “принципы”, “контекст”, и

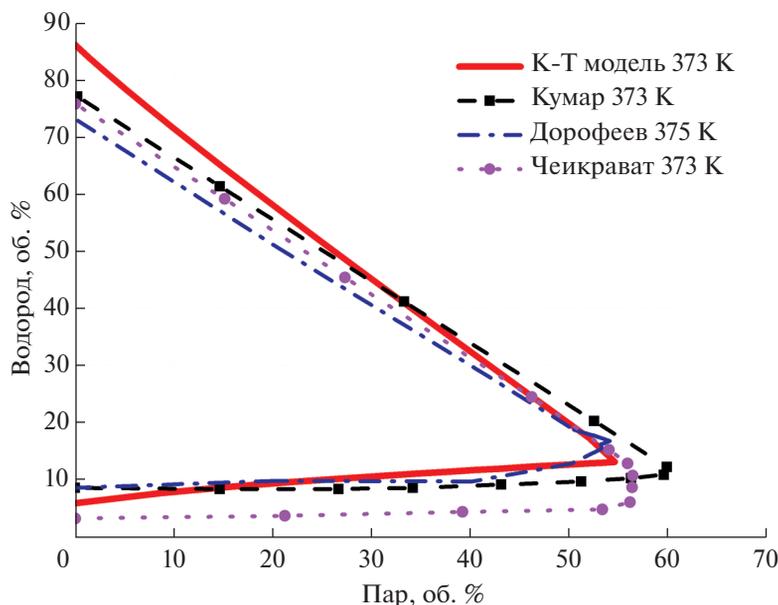


Рис. 7. Эмпирические концентрационные пределы распространения пламени вниз (Kumar, Cheikhkravat, Кушарин). Фундаментальные концентрационные пределы распространения плоских дефлаграционных пламени (неэмпирическая кинетико-термодинамическая модель). Водород–воздух–пар, 1 атм, 373 К [42].

– явного учета трех базовых типов внутри- и межсистемных взаимодействий – физических, информационных, логических.

Использование нелинейных моделей аварий позволит повысить как точность идентификации уязвимостей в комплексном обеспечении безопасности ВЭ, так и предсказательную способность анализа рисков.

Неэмпирические модели концентрационных пределов опасных процессов

Для количественной оценки концентрационных пределов ускорения пламени в последние 30 лет были предложены различные полуэмпирические корреляции [40, 41]. Указанные корреляции используют физико-химические характеристики газовых смесей (коэффициент расширения, число Зельдовича, число Льюиса) и геометрические характеристики для аппроксимации имеющихся экспериментальных наборов данных.

Чтобы улучшить понимание природы концентрационных пределов и уменьшить диапазон неопределенностей для смесей водород–воздух–пар, где возможно эффективное ускорение пламени, в [42] был предложен альтернативный подход к оценке концентрационных пределов для ускорения пламени, основанный на неэмпирическом (“из первых принципов”) кинетико-термодинамическом моделировании. С использованием только фундаментальных кинетических и термодинамических параметров смеси водород–

воздух–пар была вычислена (рис. 7) зависимость предельной концентрации пара от начальной температуры газовой смеси (373–813 К) при нормальном давлении (100 кПа), при которой происходит полное подавление ускорения пламени.

Сравнение полученной зависимости с результатами экспериментов позволило сформулировать новые экспериментальные и теоретические задачи, направленные на прояснение физической природы перехода от барических дефлаграционных пламени к практически изобарическим шаровым пламенам.

Разработка неэмпирических моделей концентрационных пределов других опасных процессов, например пределов детонации или пределов “каталитического поджига” водородно-воздушной смеси пассивными каталитическими рекомбинаторами водорода, позволит углубить понимание механизмов появления опасностей, уточнить пределы безопасной работы технических средств и выработать более эффективные методы повышения водородной безопасности.

ВЫВОДЫ

Показана необходимость в использовании двух базовых подходов к нормативному обеспечению безопасности водородной энергетики – целеориентированного подхода и риск-информированного подхода.

Выделены и кратко описаны приоритеты для экспериментальных и расчетно-теоретических исследований, необходимых для создания полно-

ценного современного корпуса нормативных документов по безопасности водородной энергетики как “системы систем”, включающей в себя как атомные энерготехнологические станции для крупномасштабного, надежного производства водорода, не зависящего от сезонных или суточных колебаний в окружающей среде, и инфраструктуры для хранения, транспортировки и распределения водорода-энергоносителя.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Легасов В.А., Пономарев-Степной Н.Н., Проценко А.Н. и др.* // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Атомно-водородная энергетика. 1976. Вып. 1. С. 5.
2. *Полякова Т.В.* // Вестник МГИМО. 2012. № 1 (22). С. 156.
3. *Kotchourko A., Baraldi D., Benard P. et al.* // JRC science and policy reports, Publications Office of the European Union. 2014. <https://doi.org/10.2790/99638>
4. *Barilo N.* // Hydrogen Safety Panel, Safety Knowledge Tools, and First Responder Training Resources, Hydrogen Program Annual Merit Review and Peer Evaluation Meeting, Washington, DC, May 1, 2019.
5. *Gibson E.J.* // CIB Report Publication 64. Rotterdam. The Netherlands. CIB (International Council for Research and Innovation in Building and Construction). 1982.
6. *Gross J.G.* // Proceedings of the 3rd International Symposium of CIB-ASTM-ISO-RILEM / Ed. Becker R., Paciak M. December 9–12 1996. Tel-Aviv, Israel, National Building Research Institute, Haifa, Israel. V. 1. P. I–II.
7. <https://www.nrc.gov/reading-rm/basic-ref/glossary/risk-informed-decisionmaking.html>
8. https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1678_web.pdf
9. WTO (World Trade Organisation), WTO Clause 2.8 of the Agreement on Technical Barriers to Trade. Geneva, Switzerland. WTO, 1997.
10. <http://isoupdate.com/standards/iso9001/>
11. UNECE Global Technical Regulation №13. 1998. UNECE.
12. О применении риск-ориентированного подхода при организации отдельных видов государственного контроля (надзора) и внесении изменений в некоторые акты Правительства Российской Федерации, Постановление Правительства РФ от 7 августа 2016 г. № 8.
13. О внесении изменений в Положение об осуществлении государственного строительного надзора в РФ, Постановление Правительства РФ от 25 октября 2017 г. № 1294; Постановление Правительства РФ от 24 декабря 2015 г. № 1418 “О государственном надзоре в области защиты населения и территорий от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера”.
14. *Coward H.F., Brinsley F.* // J. Chem. Soc. Trans. 1914. V. 105. P. 1859. <https://doi.org/10.1039/CT9140501859>
15. *Аникин Н.Б., Павленко А.В., Симоненко В.А. и др.* // Доклад на IX научном семинаре “Моделирование технологий ядерного топливного цикла” 3–7 февраля 2020, г. Снежинск, ВНИИТФ им. Забабахина.
16. *Денисенко В.П., Кириллов И.А., Мелихов А.С.* // Доклад на IX научном семинаре “Моделирование технологий ядерного топливного цикла”, 3–7 февраля 2020, г. Снежинск, ВНИИТФ им. Забабахина.
17. *Мелихов А.С., Кириллов И.А., Денисенко В.П.* // Устройство для определения концентрационных пределов распространения пламени по газовым смесям в условиях, соответствующих невесомости, патент RU 2 702 422 дата подачи заявки 11.05.2018 дата регистрации 08.10.2019.
18. *Кириллов И.А., Харитонов Н.Л., Хренников Н.Н., Шарафутдинов Р.Б.* // Доклад на V Международной научно-технической конференции “Инновационные проекты и технологии ядерной энергетики”, МНТК НИКИЭТ-2018, 2–5 октября 2018, АО НИКИЭТ.
19. *Boeck L.R., Hasslberger J., Sattelmayer T.* // Combustion Sci. Technol. 2014. V. 186. P. 1650. <https://doi.org/10.1080/00102202.2014.935619>
20. *Kuznetsov M., Yanez J., Grune J., Jordan T.* // Nucl. Eng. Des. 2015. V. 286. P. 36. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2015.01.016>
21. *Ahluwalia R.K., Hua T.Q., Peng J.K. et al.* // Technical Assessment of Cryo-Compressed Hydrogen Storage Tanks Systems for Automotive Applications. 2009. ANL/09-33. 59 p.
22. *Stetson N.T., McWhorter S., Ahn C.C.* // Compendium of Hydrogen Energy, V. 2. Hydrogen Storage, Transportation and Infrastructure, Woodhead Publishing Series in Energy, 2016. P. 3.
23. *Шильрайн Э.Э., Малышенко С.П., Кулешов Г.Г.* // Введение в водородную энергетику. М.: Энергоатомиздат, 1984. 264 с.
24. *Colozza A.J.* // Hydrogen Storage for Aircraft Applications Overview, NASA/CR-2002-211867.
25. *Pietersen C.M.* // Loss Prevention Bulletin № 64. IChemE. Rugby. 1985.
26. Liquefied Natural Gas: An Overview of the LNG Industry for Fire Marshals and Emergency Responders. National Association of State Fire Marshals. 2005. 23 p.
27. Девять самых масштабных аварий электросетей. <http://energосmi.ru/archives/16287>.
28. Руководство по безопасности “Методика оценки риска аварий на опасных производственных объектах нефтегазоперерабатывающей, нефте- и газохимической промышленности” (утв. приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 29 июня 2016 г. № 272).
29. Руководство по безопасности “Методические основы по проведению анализа опасностей и оценке риска аварий на опасных производственных объектах” Утверждено приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атом-

- ному надзору от 11 апреля 2016 г. № 144. ОПВБ-2013.
30. СТО Газпром 2-2.3-569-2011. Методическое руководство по расчету и анализу рисков при эксплуатации объектов производства, хранения и морской транспортировке сжиженного и сжатого природного газа, 2011. 111 с.
 31. СТО Газпром 2-1.1-356-2009. Методические указания по повышению устойчивости технологического оборудования производственных объектов предприятий ОАО “Газпром” к воздействию пожаров и взрывов и предотвращению каскадных эффектов. 2009. 90 с.
 32. Zio E. // Reliability Engineering and System Safety. 2018. V. 177. P. 176.
<https://doi.org/10.1016/j.ress.2018.04.020f>
 33. Zuccaro G., De Gregorio D., Leone M. // Int. J. Disaster Risk Reduction, 2018. V. 30B. P. 199.
 34. Girgin S., Necci A., Krausmann E. // Case of Natech Accidents, Elsevier, 2019.
 35. Пантелеев В.А., Кириллов И.А. // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. 2019. № 5. С. 53.
 36. Rasmussen J. // Safety Science. 1997. V. 27 (2–3). P. 183.
[https://doi.org/10.1016/S0925-7535\(97\)00052-0](https://doi.org/10.1016/S0925-7535(97)00052-0)
 37. Rasmussen J., Pejtersen A.M., Goodstein L.P. Cognitive System Engineering. New York: John Wiley & Sons, 1994.
 38. Rasmussen J., Svedung I. // Proactive Risk Management in a Dynamic Society, Swedish Rescue Services Agency. 2000.
 39. Кириллов И.А., Пантелеев В.А., Пономарев-Степной Н.Н. и др. // Доклад на IX научном семинаре “Моделирование технологий ядерного топливного цикла”, 3–7 февраля 2020, Снежинск, ВНИИТФ им. Забабахина.
 40. Дорофеев С.Б., Кузнецов М.С., Алексеев В.И., Ефименко А.А. // Препринт ИАЭ им. Курчатова, ИАЭ-6150/3. 1999.
 41. Cicarelli G., Chaumeix N., Mendiburu A. et al. // Proc. Comb. Inst. 2019. V. 37. № 3. P. 3661.
<https://doi.org/10.1016/j.proci.2018.06.045>
 42. Кириллов И.А., Плаксин В.Ю., Харитонова Н.Л. // Доклад на IX научном семинаре “Моделирование технологий ядерного топливного цикла”, 3–7 февраля 2020, Снежинск, ВНИИТФ им. Забабахина.