

УДК 621.039.58

## ОБЕСПЕЧЕНИЕ ВОДОРОДНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ НА АТОМНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЯХ С ВОДООХЛАЖДАЕМЫМИ РЕАКТОРНЫМИ УСТАНОВКАМИ. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ

Кириллов И.А., к.ф.-м.н. (kirillov\_ia@nrcki.ru) (НИЦ «Курчатовский институт»),  
Харитонов Н.А., к.т.н. (kharitonova@secnrs.ru),  
Шарафутдинов Р.Б., к.т.н. (charafoutdinov@secnrs.ru),  
Хренников Н.Н., к.ф.-м.н. (khrennikov@secnrs.ru) (ФБУ «НТЦ ЯРБ»)

*Водородная безопасность является одним из ключевых элементов обеспечения безопасности водоохлаждаемых реакторов. В статье проанализированы зарубежные и отечественные работы, направленные на повышение водородной безопасности водоохлаждаемых реакторов с учетом уроков аварии на АЭС «Фукусима-Дайичи». Рассмотрены неопределенности и ограничения существующих подходов к обеспечению водородной взрывобезопасности АЭС, в частности, проблема обеспечения безопасной работы пассивных каталитических рекомбинаторов водорода в условиях тяжелых запроектных аварий. Выделены первоочередные фундаментальные и прикладные проблемы, решение которых необходимо для целенаправленного и эффективного повышения уровня водородной безопасности на АЭС с ВВЭР.*

► **Ключевые слова:** водородная взрывобезопасность, пассивные каталитические рекомбинаторы водорода, обоснование безопасности.

## HYDROGEN SAFETY FOR NUCLEAR POWER PLANTS WITH LIGHT WATER REACTOR UNITS. CURRENT STATE OF THE PROBLEM

Kirillov I., Ph. D. (National Research Centre «Kurchatov Institute»),  
Kharitonova N., Ph. D., Sharafutdinov R., Ph. D., Krennikov N., Ph. D. (SEC NRS)

*Hydrogen safety is one of the key elements in ensuring the safety of water-cooled reactors. The article analyzes foreign and domestic works aimed at increasing the hydrogen safety of light water reactors taking into account the lessons of the accident at the Fukushima Daiichi NPP. The uncertainties and limitations of existing approaches to ensuring hydrogen explosion safety of nuclear power plants, in particular, the problem of ensuring the safe operation of passive catalytic hydrogen recombiners under severe accident conditions are considered. The fundamental and applied problems with high priority are identified. Their resolution is necessary for a purposeful and effective increase in the level of hydrogen safety at NPPs with VVER.*

► **Key words:** hydrogen safety, passive catalytic hydrogen recombiners, safety analysis.

## 1. Введение

Возможность горения водородно-воздушных смесей, угрожающих жизни людей, целостности защитной оболочки или работоспособности критического для безопасности оборудования на атомных электростанциях (АЭС) с водоохлаждаемыми реакторными установками (РУ) учитывалась с момента зарождения атомной энергетики в Советском Союзе, США, Великобритании [1, 2].

При нормальной эксплуатации водород всегда присутствует в теплоносителе первого контура РУ вследствие радиоллиза, термоллиза и других технологических процессов. Поэтому проблема обоснования водородной взрывобезопасности является актуальной и для условий нормальной эксплуатации, что подтверждается нарушениями, отмеченными на российских и зарубежных водоохлаждаемых энергоблоках, где были зафиксированы возгорания гремучей смеси в коллекторах парогенераторов и «хлопки» (дефлаграционные взрывы небольшой интенсивности) гремучей смеси под крышкой реактора и в коллекторах парогенератора при нахождении РУ в «холодном» состоянии [3, 4].

Опыт эксплуатации турбогенераторов с водородным охлаждением на АЭС в России и за рубежом также показывает, что обеспечение пожаровзрывобезопасности в машинных залах АЭС остается актуальной проблемой ввиду наличия в системах охлаждения турбогенераторов взрывоопасного водорода и использования горючего масла в масло-системах турбоагрегатов [3].

Статистика инцидентов, связанных с утечкой, накоплением и горением радиолитического водорода, также свидетельствует – проблема водородной взрывобезопасности носит всеобъемлющий характер, поскольку риск воспламенения или взрыва водородно-воздушных смесей различной интенсивности возможен при различных режимах эксплуатации АЭС [1, 4].

После запроектной аварии на АЭС «Три Майл Айленд» (ТМІ-2, США) в 1979 г. [5, 6] стало очевидно, что исключение водородного взрыва или смягчение его последствия является одной из приоритетных проблем безопасности АЭС для условий тяжелой аварии. Основными источниками водорода при таких авариях являются парациркониевая реакция и взаимодействие расплава с бетоном, которые могут приводить к выбросу большого количества водорода в защитную оболочку РУ. Взрыв такой массы водорода непосредственно угрожает целост-

ности элементов и конструкций герметичного ограждения АЭС [1].

После аварии на АЭС «Три Майл Айленд» проблема водородной взрывобезопасности перешла из разряда «теоретических» в разряд одной из системных проблем безопасности. Соответственно, и реакция на этот вызов во многих странах, использующих водоохлаждаемые реакторы, была комплексной. Обеспечение водородной взрывобезопасности стало рассматриваться как один из ключевых элементов системы технических и организационных мер по безопасности АЭС с водоохлаждаемыми реакторами. Были разработаны и введены требования об обязательном анализе процессов генерации, распространения и горения водородно-воздушных смесей при детерминистском и вероятностном анализе безопасности АЭС. Для повышения уровня понимания физико-химических и теплогидравлических процессов, связанных с водородом в условиях тяжелой запроектной аварии, были инициированы крупномасштабные национальные и международные программы научных исследований. В качестве практических мер для исключения или снижения риска потери целостности герметичного ограждения стали разрабатываться и внедряться в эксплуатацию технологии и устройства безопасного удаления водорода из атмосферы герметичного ограждения и мониторинга ее химического состава.

Актуальность проблемы эффективного и надежного обеспечения водородной взрывобезопасности возросла после аварии на АЭС «Фукусима-Дайичи» (Япония) 11 марта 2011 г. Формально на АЭС «Фукусима-Дайичи» были предусмотрены системы для снижения рисков водородного взрыва. Однако недостаточная стойкость (функциональная устойчивость) технических систем аварийного удаления и контроля концентрации водорода в условиях тяжелой аварии сделала невозможным успешное выполнение функции безопасности «поддержание целостности герметичного ограждения». Авария на АЭС «Фукусима-Дайичи» продемонстрировала факт, который необходимо принять как данность и руководство к действию – генерация, распространение и взрыв водорода в герметичном ограждении АЭС, где отсутствуют или не функционируют надлежащим образом технические средства минимизации вероятности взрывного горения водорода, могут привести к неприемлемым последствиям.

Цель данной работы – сформулировать краткий перечень наиболее актуальных научных и технологических проблем водородной взрывобезопасности, решение которых необходимо для планомерного и

эффективного повышения уровня водородной взрывобезопасности на АЭС с реакторами типа ВВЭР в Российской Федерации.

## **2. Практические вопросы водородной взрывозащиты АЭС, требующие научно-технического и методологического обоснования**

Возросшая актуальность проблем обеспечения водородной взрывобезопасности после аварии на АЭС «Фукусима-Дайичи» обусловила рассмотрение этого вопроса на заседаниях НТС Госкорпорации «Росатом», а также разработку и реализацию соответствующих рабочих программ. На основе анализа водородной взрывобезопасности действующих АЭС с РУ ВВЭР-440 и ВВЭР-1000, а также новых проектов – АЭС-2006 (Нововоронежская АЭС-2, Ленинградская АЭС-2), ВВЭР ТОИ – при тяжелой запроектной аварии с большой течью и разрыве главного циркуляционного трубопровода Ду850 с одновременной потерей всех источников переменного тока и отказом на запуск дизель-генераторов (учет опыта аварии на АЭС «Фукусима-Дайичи») были выявлены дефициты в обеспечении водородной взрывобезопасности АЭС с ВВЭР, а также недостатки обоснования водородной взрывобезопасности, которые проявляются, в том числе, в обеспечении водородной взрывобезопасности в помещениях герметичного ограждения на внекорпусной стадии тяжелой запроектной аварии при длительном обесточивании для всех проектов АЭС (учет сценария аварии на АЭС «Фукусима-Дайичи») и в обеспечении водородной взрывобезопасности в оборудовании РУ в стояночных режимах. В целом было отмечено, что в настоящее время в отрасли нет единого мнения о необходимых требованиях при определении полноты испытаний головных образцов пассивных каталитических рекомбинаторов водорода (ПКРВ), и, кроме того, у проектных организаций для новых энергоблоков АЭС с ВВЭР имеются различные подходы и критерии при выборе ПКРВ.

## **3. Неопределенности и ограничения существующих подходов к обеспечению водородной взрывобезопасности водоохлаждаемых АЭС**

Для системного повышения уровня водородной взрывобезопасности АЭС необходимо решение ряда взаимосвязанных научных и технологических проблем, которые кратко перечислены ниже.

## **3.1. Проблема обеспечения безопасной работы пассивных каталитических рекомбинаторов водорода в условиях тяжелой аварии**

### **Конструкция пассивных каталитических рекомбинаторов водорода**

Различные варианты [7 – 11] ПКРВ разрабатывались с целью предотвращения накопления водорода внутри герметичного ограждения АЭС в условиях аварии (проектной или запроектной).

В большинстве коммерчески доступных конструкций ПКРВ каталитические активные материалы (обычно платина или палладий) нанесены на несущие элементы – металлические пластины или пористые керамические элементы с развитой поверхностью контакта (шарики, цилиндры и т.д.).

Несущие элементы, как правило, помещены в нижнюю часть защитного кожуха, который, с одной стороны, обеспечивает конвекционное движение пароводородовоздушной газовой смеси вдоль каталитической поверхности (так называемый «эффект дымохода» (chimney effect)) и, тем самым, повышает до определенных пределов общую производительность рекомбинатора, а, с другой стороны, защищает поверхность катализатора от прямого попадания капель воды вследствие работы спринклерных систем (смачивание поверхности катализатора водой затрудняет работу ПКРВ).

### **Принцип работы пассивных каталитических рекомбинаторов водорода**

Каталитическая реакция окисления водорода является экзотермическим процессом, то есть в результате протекания реакции выделяется тепло. Протекание экзотермической гетерогенной химической реакции на поверхности раздела «газ/катализатор» приводит к нагреву самих несущих элементов, газообразных реагентов и продуктов реакции окисления. Нагретая газовая смесь реагентов и продуктов реакции вследствие плавучести движется вверх и приводит к формированию естественно-конвекционного течения вдоль каталитической поверхности (появлению «тяги»).

### **Преимущества пассивных каталитических рекомбинаторов водорода**

Протекание гетерогенного каталитического окисления водорода имеет несколько преимуществ по сравнению с объемными режимами горения

и основанными на них технологиями контроля водорода:

- квазистатичность (изобаричность) процесса – химическая реакция происходит при практически постоянном давлении за счет того, что фронт окисления «привязан» к каталитической поверхности и не может распространяться в пространстве (как при дефлаграционном или детонационном горении) и, следовательно, не может выступать генератором волн давления, способных распространяться по объему и оказывать механическое воздействие на защитную оболочку АЭС;

- расширенный диапазон работы по концентрации водорода – каталитическое окисление может происходить в диапазоне концентраций водорода, при которых существование самораспространяющегося пламени невозможно, а именно: каталитическое дожигание водорода возможно для концентраций водорода в пароводородно-воздушной газовой смеси ниже нижнего концентрационного предела воспламенения (<4 об. %) и выше (>75 об. %) верхнего предела существования дефлаграционного пламени;

- возможность работы в условиях высокого паросодержания – паросодержание в газовой фазе оказывает слабое влияние на скорость каталитического окисления водорода, что позволяет гарантированно удалять водород даже при работе спринклеров или в условиях высокого паросодержания в водородно-воздушной смеси;

- энергонезависимость – для инициирования каталитического окисления не нужен источник энергии, эта уникальная особенность ПКРВ позволяет использовать их даже в сценариях с полным обесточиванием АЭС;

- самопроизвольность инициирования каталитической реакции окисления – гетерогенное каталитическое окисление не требует внешних источников инициирования реакции, именно данная особенность каталитического окисления дает основание называть реакторы пассивными техническими устройствами.

#### **Недостатки пассивных каталитических реакторов водорода**

Гетерогенный характер окисления водорода в ПКРВ имеет следующие недостатки технологии каталитического сжигания водорода:

- невысокая (по сравнению с самораспространяющимися режимами горения) удельная (на единицу площади катализатора) скорость окисления

водорода – при каталитическом окислении водорода скорость удаления водорода пропорциональна площади поверхности раздела «катализатор/паро-водородно-воздушная газовая смесь» и существенно ниже (в пересчете на единицу площади поверхности) скорости удаления водорода в пламени;

- образование «горячих пятен» на поверхности катализатора и, как следствие, локальное иницирование волн горения («пламен»), самостоятельно (без воздействия катализатора) распространяющихся по газовой смеси внутри и вне корпуса ПКРВ, – скорость каталитической реакции пропорциональна концентрации водорода в пароводородно-воздушной газовой смеси. Вследствие данной фундаментальной физико-химической зависимости при повышении концентрации водорода удельная (на единицу поверхности катализатора) скорость тепловыделения растет и при превышении критического значения концентрации водорода (так называемого концентрационного предела воспламенения каталитической поверхностью) приводит к воспламенению пароводородно-воздушной газовой смеси в газовом объеме вблизи поверхности катализатора и распространению пламени внутри и вне корпуса ПКРВ для всех известных сегодня конструкций ПКРВ;

- спонтанный характер формирования «горячих пятен» на поверхности катализатора – формирование «горячих пятен» происходит вследствие пространственной неоднородности в распределении атомарных центров каталитической активности на поверхности раздела, которую невозможно устранить технологическими средствами при производстве и обработке макроскопических каталитических элементов;

- невозможность целенаправленного технического управления процессом каталитического поджига в известных сегодня конструкциях ПКРВ – как только концентрация водорода в пароводородно-воздушной газовой смеси превысит критический предел, процесс воспламенения невозможно контролировать какими-либо техническими средствами или организационными процедурами и он становится неуправляемым.

Из приведенного описания физико-химических особенностей работы ПКРВ следует, что для выполнения одной из главных функций безопасности АЭС с реакторами типа ВВЭР – обеспечения целостности защитной оболочки путем использования ПКРВ – необходимо принимать во внимание двойственный характер поведения существующих конструкций ПКРВ в условиях тяжелой аварии.

С одной стороны, существующие конструкции ПКРВ (Siemens/AREVA (Франция) – на основе пластинчатых каталитических элементов; NIS Ingenieurgesellschaft mbH (Германия); AECL/CNL (Канада); ЗАО ИНПК «РЭТ» (Россия) – на основе пористых каталитических элементов) могут обеспечить стабильную скорость удаления водорода в определенном диапазоне концентраций водорода (от 0,1 до приблизительно 10 об. %) и при этом не используют внешний источник энергии [7, 10]. С другой стороны, существует риск непреднамеренного поджига [14, 15] паро-водородно-воздушной газовой смеси «горячим пятном» ПКРВ (локализованной областью на поверхности катализатора, в которой температура катализатора значительно превышает среднее по объему значение). Поджиг возможен, если локальная концентрация водорода превысит величину концентрационного предела «каталитического воспламенения» (catalytic ignition), зависящего от конструкции ПКРВ (реакционной способности материала катализатора, способа охлаждения каталитических элементов, теплоемкостей самого катализатора, подложки, на которую он нанесен, и защитного кожуха) и химического состава пароводородно-воздушной газовой смеси (концентрации пара и химически активных примесей в атмосфере герметичного ограждения после аварии). При этом, чем выше удельная (на единицу поверхности) реакционная активность катализатора и ее удельная (на единицу объема) поверхность, тем легче (при прочих равных) реализуются условия для теплового самоускорения на каталитической поверхности и перехода к тепловому воспламенению пароводородно-воздушной газовой смеси, контактирующей с каталитической поверхностью.

При реализации такого сценария взаимодействия пароводородно-воздушных газовых смесей с ПКРВ внутри герметичного ограждения может появиться неконтролируемый (неуправляемый) источник воспламенения водорода, поскольку интенсивность поджигающего воздействия ПКРВ определяется только величиной локальной концентрации водорода вблизи кожуха ПКРВ и теплоемкостью катализатора, а направление и скорость движения пламени, инициированного работой ПКРВ, определяется полем химического состава пароводородно-воздушной газовой смеси (пространственным распределением концентраций водорода, кислорода и пара) в помещении(ях) герметичного ограждения РУ.

Тепловой режим горения водородсодержащих смесей на поверхности катализаторов исследуется с 1930-х гг. [8, 9]. Возможность нештатной работы ПКРВ и его неблагоприятные последствия в условиях тяжелой аварии на АЭС начали обсуждаться как гипотеза с начала 1990-х гг. в США, ФРГ и Советском Союзе [11]. Первые систематические исследования концентрационных границ воспламенения газовых смесей в результате работы ПКРВ для задач водородной взрывобезопасности АЭС были опубликованы в Германии (как результат сотрудничества GRS, Siemens, NIS, Becker Technologies GmbH), а затем и во Франции (AREVA, CEA, EDF). Наиболее полно в настоящее время исследован эффект и концентрационные пределы каталитического воспламенения для пластинчатых ПКРВ [14, 15]. Детальная оценка преимуществ и недостатков ПКРВ с различными конструкциями каталитической секции (пластинчатые, цилиндрические, на пористой или сетчатой основе и т.д.) требует отдельных исследований. В стадии незавершенных исследований находятся работы по количественному описанию поведения ПКРВ при различных формах и теплогидравлических условиях взаимодействия потоков пароводородно-воздушной газовой смеси с ПКРВ, которые могут происходить в условиях тяжелых запроектных аварий [16 – 18].

Решение проблемы каталитического воспламенения при сохранении неизменной конструкции ПКРВ требует существенного снижения неопределенностей как в экспериментальном определении пределов безопасной работы ПКРВ, так и в расчетном моделировании динамики пространственного распределения химического состава пароводородно-воздушных газовых смесей и их взаимодействия с ПКРВ и ограждающими конструкциями герметичного ограждения.

В связи с этим весьма перспективной представляется разработка инновационных конструкций ПКРВ, обладающих свойством тепловой самозащищенности. Под тепловой самозащищенностью в данной статье понимается способность ПКРВ либо не приводить к воспламенению паро-водородно-воздушных газовых смесей, либо не допускать распространения волн горения вне защитного кожуха ПКРВ. Начало движения в данном направлении было обозначено в европейском проекте THINCAT (Hydrogen removal from LWR containments by catalytic coated thermal insulation elements) [19]. В качестве целей проекта THINCAT было заявлено:

- снижение риска непреднамеренного воспламенения;

- улучшение условий для запуска каталитического окисления;
- отсутствие загромождения пространства под защитной оболочкой.

### 3.2. Проблема достоверности расчетного моделирования динамики стратифицированных пароводородно-воздушных газовых смесей в условиях тяжелых запроектных аварий

В настоящее время в России для обоснования водородной взрывобезопасности энергоблоков АЭС с реакторами типа ВВЭР в качестве программных средств используются коды с сосредоточенными параметрами. Учет данными кодами локальных и динамических эффектов распределения водорода в объемах герметичного ограждения затруднен [7, 11, 13].

Сочетание двух факторов – больших размеров помещений в герметичной оболочке РУ АЭС и высокой плавучести водорода в паро-воздушной газовой смеси способствует проявлению эффектов стратификации (пространственной неоднородности) течений и существенно усложняет численное моделирование распространения и горения пароводородно-воздушных газовых смесей в условиях тяжелых запроектных аварий.

Работа кодов с сосредоточенными параметрами (lumped parameter codes) основана на упрощающем предположении о пространственном однородном распределении масс и энергии в расчетном объеме (node). Данное концептуальное предположение позволяет учитывать баланс массы и энергии на пространственных масштабах отдельного расчетного объема в целом. Однако данное предположение и отсутствие моделей молекулярного и турбулентного переноса массы и энергии в кодах с сосредоточенными параметрами не позволяют учитывать локальные изменения химического состава, температуры и давления, связанные с переходными процессами формирования, движения и горения стратифицированных пароводородно-воздушных газовых смесей на более мелких масштабах, характерных, например, для ПКРВ или отдельных струй и шлейфов водорода внутри отдельного расчетного объема.

При расчетах на основе кодов с сосредоточенными параметрами используется понятие «средняя концентрация водорода» в расчетном объеме герметичного ограждения и не учитывается стратификация водорода, за счет которой локальные концентрации водорода могут существенно пре-

вышать «среднюю». Таким образом, расчеты на основе указанного подхода не гарантируют достижение локальными концентрациями водорода внутри отдельных расчетных объемов в герметичном ограждении значений, при которых возможна дефлаграция (детонация) водорода. Эта особенность программных средств со сосредоточенными параметрами затрудняет их применение для обоснования точных мест размещения элементов оборудования системы контроля концентрации и аварийного удаления водорода по объему помещений герметичного ограждения.

Коды для газодинамических вычислений течений реагирующих смесей (так называемые Reactive Computational Fluid Dynamics (RCFD) коды) в принципе позволяют моделировать средне- и мелкомасштабные особенности стратифицированных течений с учетом эффектов вязкости, теплопроводности и диффузии при распространении водорода и горении (в объеме или на поверхности катализатора). Однако их верификация и валидация для обоснования водородной взрывобезопасности затруднена в настоящее время в связи со следующими нерешенными проблемами:

- отсутствие валидированных физико-химических и численных моделей объемного горения ультрабедных (с концентрацией водорода в смеси менее 10 об. %) пароводородно-воздушных газовых смесей [20, 22];
- отсутствие представительных экспериментальных данных для разработки и валидации расчетных моделей переходных процессов в работе ПКРВ, а именно: старта работы при различных условиях взаимодействия струй и шлейфов водорода с ПКРВ; перехода к воспламенению горючей водородно-воздушной смеси для ПКРВ на основе пористых носителей катализатора;
- отсутствие протокола и типовых матриц верификации для CFD-расчетов формирования стратифицированных пароводородно-воздушных газовых смесей [23 – 26];
- отсутствие рекомендованных методик для численного расчета различных режимов горения (дефлаграционное, детонационное, переход от дефлаграции к детонации) с количественно обоснованными границами неопределенностей [27, 28];
- отсутствие подтвержденных экспериментальных и аналитических методов для учета масштабного фактора при расчете турбулентного горения предварительно перемешанных смесей (дефлаграция, детонация) и факельного горения водорода;

▪ отсутствие сквозной (единой) методики оценки как эпистемологических (epistemic – связанных с недостатком знаний) неопределенностей, включая неопределенности самих физико-химических моделей горения (объемного и каталитического), их численных реализаций в научных или коммерческих CFD-кодах, погрешностей экспериментальных данных, которые используются для верификации и валидации моделей горения, так и алеаторных (от aleatoric – случайный, произвольный) неопределенностей, связанных с внутренне присущей стохастичностью моделируемых процессов или свойств объекта моделирования, например, при переходе ламинарного пламени в турбулентный режим или развитии газодинамических или диффузионно-тепловых неустойчивостей фронта горения.

Для повышения достоверности численных расчетов характеристик пароводородновоздушных газовых смесей в условиях тяжелой аварии и для снижения существующих неопределенностей в физико-химических моделях течений стратифицированных горючих водородно-воздушных смесей в численных алгоритмах, а также в начальных данных для расчетов необходимы более точные экспериментальные данные о механизмах формирования и количественных характеристиках локальных особенностей горючих водородно-воздушных смесей, образующихся за счет взаимодействия ПКРВ с атмосферой герметичного ограждения с учетом специфики его размещения как на стадии формирования смесей, так и на стадии горения.

Для получения таких данных необходимо проведение дополнительных экспериментов в условиях, которые пока не получили удовлетворительного решения в европейских и международных проектах по распространению и горению водорода, таких как SARNET/SARNET2, THAI/THAI-2/THAI-3/THAI-4, MITHYGENE, REKO/REKO-2/REKO-3/REKO-4 [29 – 32].

### 3.3. Проблема уточнения количественных критериев водородной взрывобезопасности

Концентрационные пределы режимов горения и детонации определяются в настоящее время по диаграмме Шапиро-Моффети, не учитывающей зависимость пределов от размеров и формы объема, а также режима течения пароводородновоздушных газовых смесей.

В настоящее время используются, как правило, два количественных критерия водородной взрыво-

безопасности – концентрационный и геометрический [7].

Пароводородновоздушные газовые смеси считаются безопасными с точки зрения возможности их воспламенения и последующего распространения дефлаграционного и детонационного горения, если выполняются два следующих условия [7]:

▪ численные значения концентрации (объемной доли) водорода (горючего) и кислорода (окислителя) находятся вне соответствующих (по водороду и кислороду) концентрационных пределов дефлаграционного/детонационного горения;

▪ размер канала/помещения, в котором распространяется пламя или детонационная волна, превышает соответствующий минимальный размер; для пламени это критический диаметр (или длина гашения пламени) [33], для детонационной волны – характерный минимальный размер, пропорциональный размеру детонационной ячейки [34].

Численные значения концентрационных пределов для пароводородновоздушных газовых смесей зависят от начальной температуры и давления и являются фундаментальными физико-химическими характеристиками однородной пароводородновоздушной газовой смеси. Длина гашения и размер детонационной ячейки зависят от концентрации водорода в газовой смеси, ее начальной температуры и давления, а также от локальных условий теплообмена со стенками трубы или помещения, в котором происходит распространение пламени. Все три характеристики (концентрационные пределы распространения пламени и детонации, длина гашения, размер детонационной ячейки) однозначно определены только для предварительно перемешанных, пространственно-однородных по химическому составу пароводородновоздушных газовых смесей.

Как неоднократно отмечалось в исследовательских работах и обзорах по водородной взрывобезопасности [35 – 37], в условиях тяжелых запроектных аварий высокая плавучесть водорода и большие размеры свободного пространства внутри герметичного ограждения с высокой вероятностью могут приводить к существенной локальной или глобальной стратификации пароводородновоздушной газовой смеси. Поэтому возникает проблема количественной оценки опасности стратифицированных смесей, в которых характерная концентрация водорода одной части смеси находится вне концентрационных пределов, а другая – внутри этих пределов.

Другими нерешенными аспектами проблемы критериев водородной взрывобезопасности, требующими своего научного и нормативного уточнения, являются:

- отсутствие количественных критериев границ безопасной работы ПКРВ, которые можно однозначно трактовать при экспериментальном исследовании различных конструкций ПКРВ [38];
- отсутствие количественных критериев адекватности выбора мест размещения ПКРВ в герметичном ограждении и достаточности требований к производительности как отдельного ПКРВ, так и их системы в целом [39].

#### **4. Актуальные для отечественных АЭС с реакторами типа ВВЭР направления научных исследований и инженерных разработок по проблемам водородной взрывобезопасности**

На основании анализа отмеченных проблем для обеспечения водородной взрывобезопасности на данном этапе представляется актуальным решение следующих задач:

- разработка критериев количественной оценки уровня взрывобезопасности пароводородно-воздушных газовых смесей в герметичном ограждении с явным учетом их стратификации;
- уточнение нижнего концентрационного предела самораспространяющегося дефлаграционного горения, способного к переходу в детонацию (так называемых «быстрых пламен» [34]), и его зависимость от температуры и давления пароводородно-воздушных газовых смесей;
- разработка количественных (измеряемых или вычисляемых) индикаторов (параметров) и соответствующих критериев опасности объемного и каталитического горения водорода в ультрабедных (менее 10 об. % водорода) пароводородно-воздушных газовых смесях;
- экспериментальное изучение механизмов перехода «пузырькового» горения в дефлаграционное пламя в стратифицированных пароводородно-воздушных газовых смесях;
- экспериментальное исследование концентрационных и геометрических пределов «каталитического поджига» пароводородно-воздушных газовых смесей для ПКРВ на основе пористых носителей катализатора;
- исследование механизмов и последствий взаимодействия ПКРВ со струями и шлейфами

водорода для представительных сценариев тяжелых запроектных аварий;

- разработка ПКРВ с внутренней самозащищенностью;
- разработка методик по обоснованию мест размещения элементов систем контроля концентрации и аварийного удаления водорода в герметичном ограждении с учетом эффектов стратификации, а также эффекта «каталитического поджига» и работы систем безопасности РУ и спринклерных систем;
- разработка отечественных программных средств для газодинамического моделирования объемного и каталитического горения пароводородно-воздушных газовых смесей (reactive CFD/RCFD-кодов) и поддерживающих численные расчеты баз термодинамических и кинетических данных для реалистичной оценки распространения и горения водорода в герметичном ограждении;
- разработка свода правил или рекомендаций по проектированию систем мониторинга и контроля водорода;
- повышение уровня водородной взрывобезопасности герметичного ограждения за счет уточнения противоаварийных процедур, непосредственно связанных с обеспечением водородной безопасности, в руководствах по управлению запроектными/тяжелыми авариями.

#### **5. Заключение**

Выполненная оценка тенденций в решении проблем обеспечения водородной взрывобезопасности для тяжелых запроектных аварий показала необходимость качественного и количественного изучения всего спектра физических и физико-химических явлений, существенных для анализа безопасности АЭС при тяжелых запроектных авариях, понимание природы которых позволит обеспечить водородную взрывобезопасность на АЭС. Сформулирован примерный перечень проблем, решение которых необходимо для повышения уровня водородной взрывобезопасности на АЭС с ВВЭР в Российской Федерации.

Показано, что для обоснования безопасности применения ПКРВ на АЭС с реакторами типа ВВЭР необходимы более точные данные о механизмах формирования и количественных характеристиках локальных особенностей горючих водородно-воздушных смесей, образующихся за счет взаимодействия ПКРВ с атмосферой герметичного ограждения с учетом специфики его размещения.

Отмечена необходимость получения экспериментальных и расчетных результатов, подтверждающих, что ПКРВ не станет неуправляемым источником поджига пароводородно-воздушной

газовой смеси во всем диапазоне условий, характерных для представительных сценариев тяжелых запроектных аварий.

### Список литературы

1. International Atomic Energy Agency (IAEA), Mitigation of hydrogen hazards in water cooled power reactors, IAEA-TECDOC-1196. – Vienna, 2001.
2. Shapiro Z. M., Moffette T. R. Hydrogen Flammability Data and Application to PWR Loss-of-Coolant Accident, WAPD-SC-545, Westinghouse Electric Corp. – Bettis Plant, Pittsburgh, 1957; The Theoretical Possibilities and Consequences of Major Accidents in Large Nuclear Power Plants, WASH-740, Atomic Energy Commission, 1957.
3. Солдатов Г. Е., Голоднова О. С. О путях снижения риска пожаров в машинных залах АЭС // Атомкон. – 2009. – № 2 (3).
4. Kempell I. D., et al. Hydrogen Explosions – an Example of Hazard Avoidance and Control, IChemE, Symp. Series № 148, 523-539, 2001.
5. Berman N. M., (Ed.) Proc. of the Workshop on the Impact of Hydrogen on Water Reactor Safety. NUREG/CR-2017, SAND 81-0661. – Sandia National Labs, Albuquerque, NM, 1981.
6. Camp A. L. et al. Light Water Reactor Hydrogen Manual, NUREG/CR-2726, SAND 82-113. – Sandia National Labs, Albuquerque, NM, 1983.
7. Della Loggia E. (editor). Hydrogen behavior and mitigation in water-cooled nuclear power reactors. ISBN 92-826-3364-0, ECSC-EEC-EAEC, Brussels, Luxembourg – 1992.
8. Arnould F. Et al. State of Art on Hydrogen Passive Autocatalytic Recombiner, European Union PARSOAR Project // Proceedings of the 9th International Conference on Nuclear Energy (ICONE). – Nice, France, 2001.
9. Mitigation of hydrogen hazards in severe accidents in nuclear power plants, IAEA-TECDOC-1661, 2011.
10. Gupta S., Kanzleiter T., Poss G. Passive autocatalytic recombiners (PAR) and the resulting hydrogen deflagration behavior in LWR containments // The 16th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics (NURETH-16), At Hyatt Regency Chicago. – Chicago, IL, USA, 2015.
11. Gupta S., et al. THAI test facility for experimental research on hydrogen and fission product behavior in light water reactor containments // Nuclear Engineering and Design. – 2015. – vol. 294.
12. Davies W. The rate of heating of wires by surface combustion // The London, Edinburgh and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science. – 1934. – vol. 17. – p. 233. – DOI: 10.1080/14786443409462387; Catalytic combustion at high temperatures. – 1935. – vol. 19. – p. 309. – DOI: 10.1080/14786443508561378.
13. Бубен Н. Я., Сборник работ по физической химии // Журнал физической химии. Дополнительный том. – 1946. – С. 148, 154.
14. Liang Z., Gardner L., Clouthier T., Thomas B. Experimental study of effect of ambient flow condition on the performance of a passive autocatalytic recombiner // Nuclear Engineering and Design. – 2016. – vol. 301.
15. Bentaib A., Meynet N., Bleyer A., Overview on hydrogen risk research and development activities: methodology and open issues // Nuclear Engineering and Technology. – 2015.
16. Simon B., Reinecke E. A., Kubelt C., Allein H. J. Start-up behavior of a passive auto-catalytic recombiner under counter flow conditions: results of a first orienting experimental study // Nuclear Engineering and Design. – 2014. – vol. 278.
17. Hydrogen removal from LWR containments by catalytic coated thermal insulation elements, THINCAT R&D project, 5th Framework Program Project: [http://cordis.europa.eu/project/rcn/52743\\_en.html](http://cordis.europa.eu/project/rcn/52743_en.html).
18. Royle P., et al. Status of Development, Validation and Application of the 3D CFD-code GASFLOW at FZK // IAEA-OECD Technical Meeting on the Use of Computational Fluid Dynamics (CFD) Codes for Safety Analysis of Reactor Systems, including the Containment. – Pisa, Italy, 2002.
19. Sathiah P., et al. The role of CFD combustion modeling in hydrogen safety management – Part I: Validation based on small scale experiments // Nuclear Engineering and Design. – 2012. – vol. 248.
20. Wolf L., Valencia L. Results of the PHDR Computational Benchmark Exercises on Hydrogen Distribution Experiments E11.2 and E11.4.
21. Baraldi D., et al., Gap Analysis of CFD Modeling of Accidental Hydrogen Release and Combustion, JRC Scientific & Technical Reports, JRC58011, 2010.

22. Кириллов И. А. О кинетической природе фундаментальных концентрационных пределов горения водородно-воздушных смесей // Доклад на V научном семинаре «Моделирование технологий ядерного топливного цикла», Снежинск, 25 – 29 января 2016 г. – Снежинск, 2016.
23. Agrawal N., Prabhakar A., Das S. K., Hydrogen distribution in nuclear reactor containment during accidents and associated heat and mass transfer issues: a review // *Heat Transfer Engineering*. – 2015. – 36 (10).
24. Communication from the Commission to the Council and the European Parliament on the Comprehensive Risk and Safety Assessments («Stress Tests») of Nuclear Power Plants in the European Union and Related Activities // European Commission, Brussels, October 2012. – Brussels, 2012.
25. Kudriakov S., Dabbene F., Studer E., Beccantini A., Magnaud J. P., Paillère H., Bentaib A., Bleyer A., Malet J., Porcheron E., Caroli C. The TONUS CFD code for hydrogen risk analysis: physical models, numerical schemes and validation matrix // *Nuclear Engineering and Design*. – 2008. – vol. 238 (3).
26. Paladino D., Andreani M., Zboray R., Dreier J. Toward a CFD-grade database addressing LWR containment phenomena // *Nuclear Engineering and Design*. – 2012. – vol. 253. – pp. 331–342.
27. Jakel C., Kelm S., Reinecke E. A., Verfondern K., Allelein H. J. Validation strategy for CFD models describing safety-related scenarios including LH<sub>2</sub>/GH<sub>2</sub> release and the use of passive auto-catalytic recombiners // *International Journal of Hydrogen Energy*. – 2014.
28. Boyd C. Perspectives on CFD analysis in nuclear reactor regulation // *Nuclear Engineering and Design*. – 2016. – vol. 299.
29. Research and Development with Regard to Severe Accidents in Pressurized Water Reactors: Summary and Outlook // Technical Report IRSN/2007e083, IRSN, Fontenay-aux-Roses, France, 2007. – Fontenay-aux-Roses, 2007.
30. Malet J., et al. Sprays in Containment: Final Results of the SARNET Spray Benchmark // 3rd European Review Meeting on Severe Accident Research (ERMSAR-2008), Nesseber, Bulgaria, September 23 – 25, 2008. – Nesseber, 2008.
31. Проект MITHYGENE // IRSN. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.irsn.fr/EN/Research/Research-organisation/Research-programmes/Mithygene-project/Pages/MITHYGENE-project.aspx>
32. Simon B., Reinecke E. A., Klauck M., Heidelberg D., Allelein H. J. Investigation of PAR Behabopur in the REKO-4 Test Facility, ICONE20-Power2012-54234 // 20th Int. Conf. on Nuclear Engineering and the ASME conference, vol. 2, pp. 345–356, 2012.
33. Зельдович Я. Б., Баренблатт Г. И., Либрович В. Б., Махвиладзе Г. М. Математическая теория горения и взрыва. – М.: Наука, 1980.
34. Dorofeev S. B. et al. Effect of Scale and Mixture Properties on Behavior of Turbulent Flames // Preprint IAEA-6127/3. – Moscow, 1999.
35. Agrawal N., Prabhakar A., Das S. K. Hydrogen distribution in nuclear reactor containment during accidents and associated heat and mass transfer issues: a review // *Heat Transfer Engineering*. – 2015. – vol. 36 (10).
36. Hoyes J. R., Ivings M. J. CFD modeling of hydrogen stratification in enclosures: Model validation and application to PAR performance // *Nuclear Engineering and Design*. – 2016. – vol. 310.
37. Reinecke E.-A. et al. Open issues in the applicability of recombiner experiments and modeling to reactor simulations // *Progress in Nuclear Energy*. – 2010. – vol. 52. – pp. 136–147.
38. Кириллов И. А. и др. Целеориентированный подход к мониторингу водородной безопасности АЭС // Доклад на V научном семинаре «Моделирование технологий ядерного топливного цикла», Снежинск, 25 – 29 января 2016 г.

## References

1. International Atomic Energy Agency (IAEA), Mitigation of hydrogen hazards in water cooled power reactors, IAEA-TECDOC-1196. – Vienna, 2001.
2. Shapiro Z. M., Moffette T. R. Hydrogen Flammability Data and Application to PWR Loss-of-Coolant Accident, WAPD-SC-545, Westinghouse Electric Corp. – Bettis Plant, Pittsburgh, 1957; The Theoretical Possibilities and Consequences of Major Accidents in Large Nuclear Power Plants, WASH-740, Atomic Energy Commission, 1957.
3. Soldatov G. E., Golodnova O. S. About the ways to mitigate fire risks in NPP turbine hall // *Atomkon*. – 2009. – № 2 (3).
4. Kempshell I. D., et al. Hydrogen Explosions – an Example of Hazard Avoidance and Control, IChemE, Symp. Series № 148, 523-539, 2001.

5. Berman N. M., (Ed.) Proc. of the Workshop on the Impact of Hydrogen on Water Reactor Safety. NUREG/CR-2017, SAND 81-0661. – Sandia National Labs, Albuquerque, NM, 1981.
6. Camp A. L. et al. Light Water Reactor Hydrogen Manual, NUREG/CR-2726, SAND 82-113. – Sandia National Labs, Albuquerque, NM, 1983.
7. Della Loggia E. (editor). Hydrogen behavior and mitigation in water-cooled nuclear power reactors. ISBN 92-826-3364-0, ECSC-EEC-EAEC, Brussels, Luxembourg – 1992.
8. Arnould F. Et al. State of Art on Hydrogen Passive Autocatalytic Recombiner, European Union PARSOAR Project // Proceedings of the 9th International Conference on Nuclear Energy (ICONE). – Nice, France, 2001.
9. Mitigation of hydrogen hazards in severe accidents in nuclear power plants, IAEA-TECDOC-1661, 2011.
10. Gupta S., Kanzleiter T., Poss G. Passive autocatalytic recombiners (PAR) and the resulting hydrogen deflagration behavior in LWR containment // The 16th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics (NURETH-16), At Hyatt Regency Chicago. – Chicago, IL, USA, 2015.
11. Gupta S., et al. THAI test facility for experimental research on hydrogen and fission product behavior in light water reactor containments // Nuclear Engineering and Design. – 2015. – vol. 294.
12. Davies W. The rate of heating of wires by surface combustion // The London, Edinburgh and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science. – 1934. –vol. 17. – p. 233. – DOI: 10.1080/14786443409462387; Catalytic combustion at high temperatures. – 1935. – vol. 19. – p. 309. – DOI: 10.1080/14786443508561378.
13. Buben N. Ya., Collection of works on physical chemistry // Physical chemistry journal. Supplementary volume. – 1946. – pages 148, 154.
14. Liang Z., Gardner L., Clouthier T., Thomas B. Experimental study of effect of ambient flow condition on the performance of as passive autocatalytic recombiner // Nuclear Engineering and Design. – 2016. – vol. 301.
15. Bentaib A., Meynet N., Bleyer A., Overview on hydrogen risk research and development activities: methodology and open issues // Nuclear Engineering and Technology. – 2015.
16. Simon B., Reinecke E. A., Kubelt C., Allein H. J. Start-up behavior of a passive auto-catalytic recombiner under counter flow conditions: results of a first orienting experimental study // Nuclear Engineering and Design. – 2014. – vol. 278.
17. Hydrogen removal from LWR containments by catalytic coated thermal insulation elements, THINCAT R&D project, 5th Framework Program Project: [http://cordis.europa.eu/project/rcn/52743\\_en.html](http://cordis.europa.eu/project/rcn/52743_en.html).
18. Royl P., et al. Status of Development, Validation and Application of the 3D CFD-code GASFLOW at FZK // IAEA-OECD Technical Meeting on the Use of Computational Fluid Dynamics (CFD) Codes for Safety Analysis of Reactor Systems, including the Containment. – Pisa, Italy, 2002.
19. Sathiah P., et al. The role of CFD combustion modeling in hydrogen safety management – Part I: Validation based on small scale experiments // Nuclear Engineering and Design. – 2012. – vol. 248.
20. Wolf L., Valencia L. Results of the PHDR Computational Benchmark Exercises on Hydrogen Distribution Experiments E11.2 and E11.4.
21. Baraldi D., et al., Gap Analysis of CFD Modeling of Accidental Hydrogen Release and Combustion, JRC Scientific & Technical Reports, JRC58011, 2010.
22. Kirillov I. A. About the kinetic nature of the fundamental concentration limits of hydrogen-air mixtures combustion // Report to the Vth scientific seminar «Modelling of nuclear fuel cycle technologies», Snezhinsk, January 25 – 29, 2016 – Snezhinsk, 2016.
23. Agrawal N., Prabhakar A., Das S. K., Hydrogen distribution in nuclear reactor containment during accidents and associated heat and mass transfer issues: a review // Heat Transfer Engineering. – 2015. – 36 (10).
24. Communication from the Commission to the Council and the European Parliament on the Comprehensive Risk and Safety Assessments («Stress Tests») of Nuclear Power Plants in the European Union and Related Activities // European Commission, Brussels, October 2012. – Brussels, 2012.
25. Kudriakov S., Dabbene F., Studer E., Beccantini A., Magnaud J. P., Paillère H., Bentaib A., Bleyer A., Malet J., Porcheron E., Caroli C. The TONUS CFD code for hydrogen risk analysis: physical models, numerical schemes and validation matrix // Nuclear Engineering and Design. – 2008. – vol. 238 (3).
26. Paladino D., Andreani M., Zboray R., Dreier J. Toward a CFD-grade database addressing LWR containment phenomena // Nuclear Engineering and Design. – 2012. – vol. 253. – pp. 331–342.
27. Jakel C., Kelm S., Reinecke E. A., Verfondern K., Allein H. J. Validation strategy for CFD models describing safety-related scenarios including LH2/GH2 release and the use of passive auto-catalytic recombiners // International Journal of Hydrogen Energy. – 2014.

28. Boyd C. Perspectives on CFD analysis in nuclear reactor regulation // Nuclear Engineering and Design. – 2016. – vol. 299.
29. Research and Development with Regard to Severe Accidents in Pressurized Water Reactors: Summary and Outlook // Technical Report IRSN/2007e083, IRSN, Fontenay-aux-Roses, France, 2007. – Fontenay-aux-Roses, 2007.
30. Malet J., et al. Sprays in Containment: Final Results of the SARNET Spray Benchmark // 3rd European Review Meeting on Severe Accident Research (ERMSAR-2008), Nesseber, Bulgaria, September 23 – 25, 2008. – Nesseber, 2008.
31. Project MITHYGENE // IRSN. [Electronic resource]. – Access mode: <http://www.irsn.fr/EN/Research/Research-organisation/Research-programmes/Mithygene-project/Pages/MITHYGENE-project.aspx>
32. Simon B., Reinecke E. A., Klauck M., Heidelberg D., Allelein H. J. Investigation of PAR Behabopur in the REKO-4 Test Facility, ICONE20-Power2012-54234 // 20th Int. Conf. on Nuclear Engineering and the ASME conference, vol. 2, pp. 345–356, 2012.
33. Zeldovich Ya. B., Barenblatt G. I., Librovich V. B., Mahviladze G. M. Mathematical theory of combustion and explosion. – M.: Science, 1980.
34. Dorofeev S. B. et al. Effect of Scale and Mixture Properties on Behavior of Turbulent Flames // Preprint IAEA-6127/3. – Moscow, 1999.
35. Agrawal N., Prabhakar A., Das S. K. Hydrogen distribution in nuclear reactor containment during accidents and associated heat and mass transfer issues: a review // Heat Transfer Engineering. – 2015. – vol. 36 (10).
36. Hoyes J. R., Ivings M. J. CFD modeling of hydrogen stratification in enclosures: Model validation and application to PAR performance // Nuclear Engineering and Design. – 2016. – vol. 310.
37. Reinecke E.-A. et al. Open issues in the applicability of recombiner experiments and modeling to reactor simulations // Progress in Nuclear Energy. – 2010. – vol. 52. – pp. 136–147.
38. Kirillov I. A. and others. The goal-oriented approach to NPP hydrogen safety monitoring // Report to the Vth scientific seminar «Modelling of nuclear fuel cycle technologies», Snezhinsk, January, 25 – 29, 2016.

