

ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛОМАССОБМЕНА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ УСТАНОВОК БМ-ЛР И БМ-П ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЙ РЕКОМБИНАТОРОВ

А. А. Рякин, О. В. Койнов, М. В. Никульшин

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ», г. Снежинск Челябинской обл.

Введение

Возможность горения водородно-воздушных смесей, угрожающих жизни людей, целостности защитной оболочки или работоспособности критичного для безопасности оборудования на атомных электростанциях (АЭС) с водоохлаждаемыми реакторными установками (РУ) учитывалась с момента зарождения атомной энергетики в Советском Союзе, США, Великобритании [1]. При нормальной эксплуатации водород всегда присутствует в теплоносителе первого контура РУ вследствие радиолиза, термоллиза и других технологических процессов, 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. Поэтому проблема обоснования водородной взрывобезопасности является актуальной для условий нормальной эксплуатации и аварийных ситуаций.

В качестве практических мер для исключения или снижения риска потери целостности герметичного ограждения разрабатываются и внедряются в эксплуатацию технологии и устройства безопасного удаления водорода из атмосферы герметичного ограждения и мониторинга ее химического состава. Одним из таких устройств является рекомбинатор, который служит для беспламенного сжигания водорода при помощи катализатора.

Вопросы водородной безопасности в настоящее время рассматриваются в различных научно-исследовательских центрах нашей страны. Расчетное моделирование развития тяжелой аварии в защитной оболочке [2] проводилось в ОАО «ОКБМ Африкантов», г. Нижний Новгород.

Численные исследования заключались в прогнозировании термогидравлических процессов, происходящих в экспериментальных установках TOSQAN (IRSN, Франция), MISTRA (CEA, Франция) и PANDA (PSI, Швейцария).

В Российской Федерации также есть стенды для исследования вопросов водородной безопасности, такие как крупномасштабный стенд в НИТИ [3], и стенд СПОТ 30 [3], но существенным недостатком является то, что эти стенды не предназначены для исследования взрывных явлений, и направлены на

исследования влияния на стратификацию водорода различных факторов.

Отдельный интерес представляет расчетное исследование рекомбинаторов в ИБРАЭ РАН, Москва [3], в котором описаны уравнения физико-математической модели рекомбинатора в различных коммерческих программных кодах конечно-элементного анализа. Также представлено описание рекомбинации водорода и гидравлического сопротивления в катализаторе. Модель рекомбинатора водорода была верифицирована по экспериментальным данным, и способна воспроизводить экспериментальную производительность рекомбинаторов, а также состав и температуру выходной смеси на выходе из рекомбинатора. Но отмечен тот факт, что необходимо проведение экспериментальных исследований рекомбинаторов в газовой среде с повышенным содержанием водорода (более 10 %), малым содержанием кислорода и наличием пара. Наличие перечисленных факторов позволит улучшить достоверность результатов в задачах моделирования процессов, происходящих при тяжелой аварии в защитной оболочке. Таким образом, существует еще ряд вопросов водородной безопасности, связанных с исследованием рекомбинаторов и способов исследования их характеристик.

В настоящее время в РФЯЦ-ВНИИТФ исследуется рекомбинатор водорода на основе высокопористых ячеистых материалов (пеноникель).

Рекомбинатор служит для беспламенного сжигания водорода.

Цель расчетных исследований представленных в работе:

1) прогнозирование процессов, вероятных при проведении экспериментов на установке БМ-ЛР (большой макет легкий для рекомбинаторов) при исследовании рекомбинаторов;

2) расчетное обоснование достаточности системы теплоотвода для камеры БМ-П (большой макет прочный).

Расчетные исследования камеры БМ-ЛР позволили прогнозировать процессы, которые происходят при исследовании рекомбинаторов в камерах, и сделать вывод о применимости использования камеры БМ-ЛР для исследования рекомбинаторов.

Расчеты системы теплоотвода камеры БМ-П позволили обосновать вариант системы теплоотвода, который сделал возможным проведение исследований рекомбинаторов, превратив камеру БМ-П в уни-

версальный стенд для экспериментальных исследований процессов, происходящих в камере БМ-П.

Описание конструкции рекомбинатора

Рекомбинатор – устройство для удаления водорода из газовой смеси, состоящее из корпуса и блока катализаторов. Катализаторы – вещества, которые изменяют скорость реакции, а сами к концу процесса остаются неизменными как по составу, так и по массе. На поверхности катализаторов непосредственно осуществляется реакция рекомбинации водорода. В рекомбинаторе катализатор представляет собой высокопористый ячеистый никель с подложкой из активной окиси алюминия.

Корпус служит контейнером для хранения пластин катализаторов и их защитой от внешних воздействий. Корпус рекомбинатора имеет вид трубы квадратного сечения, выполненной из нержавеющей стали с толщиной листа 1 мм.

Преимущества пассивных каталитических рекомбинаторов водорода (ПКРВ):

– 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). 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 пароводородновоздушной газовой смеси ниже нижнего концентрационного предела воспламенения (<4 об. %) и выше (>75 об. %) верхнего предела существования дефлаграционного пламени;

– возможность работы в условиях высокого содержания пара. Содержание пара в газовой фазе оказывает слабое влияние на скорость каталитического окисления водорода, что позволяет гарантированно удалять водород даже при работе спринклеров или в условиях высокого содержания пара в водородновоздушной смеси. Энергонезависимость – для иницирования каталитического окисления не нужен источник энергии. Эта уникальная особенность ПКРВ позволяет использовать их даже в сценариях с полным обесточиванием АЭС;

– самопроизвольность иницирования каталитической реакции окисления – гетерогенное каталитическое окисление не требует внешних источников иницирования реакции. Именно данная особенность каталитического окисления дает основание называть рекомбинаторы пассивными техническими устройствами.

Недостатки ПКРВ:

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

2) 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;

3) невозможность целенаправленного технического управления процессом каталитического поджига в известных сегодня конструкциях ПКРВ – как только концентрация водорода в пароводородновоздушной 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.

Рекомбинатор оснащен колпаком и устройством открытия и закрытия входов рекомбинатора для исключения самопроизвольного начала работы рекомбинатора. Колпак представляет собой треугольную призму с одним выходным отверстием.

Конструкция камеры БМ-ЛР

Установка БМ-ЛР состоит из вложенных друг в друга камер. Внутренняя камера оснащена креплением рекомбинатора и клапаном для стравливания газов из внутренней камеры наружу при превышении давления $P_{атм} = 98$ кПа. Клапан установлен на потолке камеры и представляет собой полу трубу из Ст.3 толщиной 2 мм и диаметром $\varnothing 190$ мм, другой конец которой выходит в атмосферу, проходя насквозь потолок внешней камеры. Одна из стенок камеры внутренней представляет собой поликарбонатный лист толщиной 5 мм. Крепление поликарбонатного листа в камере обеспечивает плотное прилегание его к раме и возможность его свободного расширения при нагреве без образования щелей. При росте давления внутри камеры в процессе дефлаграции смеси предполагается вылет поликарбонатной стенки с сохранением целостности остальных стен.

Между внутренней камерой и «термосом» расстояние 400 мм. В нижнюю часть «термоса» встроены два воздуховода (отверстия диаметром 200 мм). Воздух от тепловых пушек обдувает внутреннюю камеру для поддержания необходимой для проведения эксперимента температуры.

Конечно-элементная модель камеры БМ-ЛР

На рис. 1. представлена конечно-элементная модель камеры БМ-ЛР и рекомбинатора.

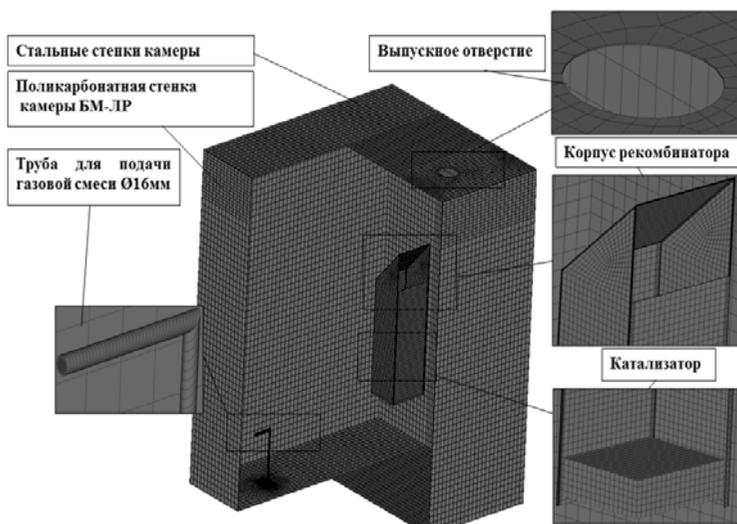


Рис. 1. Конечно-элементная модель камеры БМ-ЛР и рекомбинатора

Граничные условия для расчетов камеры БМ-ЛР

Граничные условия, используемые для расчетов температурных полей камеры БМ-ЛР и рекомбинатора, представлены в таблице.

Граничные условия для расчетов температурных полей камеры БМ-ЛР и рекомбинатора

Параметр	1 вариант	2 вариант
Начальная температура конструкции	110 °С	
Граничные условия на стенках камеры (конвективный теплообмен)	110 °С $\alpha = 7,6 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$	
Давление внутри камеры	98 кПа	
Давление на границе выпускного отверстия	98 кПа	
Температура подаваемой газовой смеси	110 °С	
Расход массовой смеси	16 г/с	40 г/с
Энерговыделение на катализаторе	9.6 кВт	24кВт

Выводы по результатам расчетов камеры БМ-ЛР

Проведены расчетные исследования температурных полей камеры БМ-ЛР [4] при различных режимах работы рекомбинатора.

При режиме энерговыделения в катализаторе 9,6 кВт (концентрация водорода – 3 %) максимальная температура катализатора составляет 245 °С на момент времени 12 минут, максимальная температура воздуха 240 °С. Металлические стенки камеры нагреваются до 161 °С, стенка из поликарбоната не достигает температуры плавления.

При режиме энерговыделения в катализаторе 24 кВт (концентрация водорода – 8 %) максимальная температура катализатора составляет 386 °С, значение температуры воздуха 383 °С. Температура плавления 150 °С на поликарбонатной стенке достигается через 3 минуты.

Из представленных результатов, можно сделать вывод, что проводить исследования рекомбинатора в камере БМ-ЛР допустимо при концентрациях водорода до 3 %, при более высоких концентрациях водорода повышение температуры приводит к расплавлению поликарбонатного листа.

Для исправления ситуации необходимо оснащение камеры БМ-ЛР системой теплоотвода, либо проведения исследования рекомбинаторов при более высоких концентрациях водорода в камере БМ-П.

Конструкция камеры БМ-П и системы теплоотвода

Для проведения испытаний по определению диапазона концентраций водорода, в котором осуществляется режим беспламенной работы рекомбинатора при различных давлениях атмосферы, повышенных температурах и влажностях, характерных для сценария тяжелых аварий на АЭС, используется камера БМ-П [5].

Камера БМ-П представляет собой стальную цилиндрическую камеру высотой 5 м и диаметром 2 м. Стенки камеры теплоизолированы и снабжены системой нагрева и термостабилизации. В камере БМ-П проводятся исследования при значениях давления выше атмосферного и повышенных значениях температуры. На рис. 2. представлен внешний вид камеры БМ-П.

Для проведения исследований рекомбинатора используется одна из колонн камеры БМ-П. Внутри камеры БМ-П размещается рекомбинатор с катализаторами, система измерения и система охлаждения. Так как при работе рекомбинатора внутри камеры реализуются крайне высокие значения температуры, что может привести к загоранию пароводяной смеси,

необходимо наличие внутри камеры эффективной системы охлаждения. В первоначальном исполнении система теплоотвода представляла собой калорифер, в который с помощью насоса подавался воздух с температурой соответствующей температуре среды. Данная схема оказалась неэффективной, и было принято решение об оснащении камеры БМ-П системой теплоотвода с теплоносителем вода.

Расчетным путем необходимо было обосновать достаточность системы теплоотвода для выполнения условия – не превышения значения среднеобъемной температуры 150 °С в камере БМ-П. Так как ранее проводились предварительные испытания варианта системы теплоотвода с калорифером и воздушным теплоносителем, было принято решение провести расчеты по верификации конечно-элементной модели с теплоносителем воздух, а затем провести расчет на верифицированной модели с теплоносителем вода, что позволило оценить эффективность системы теплоотвода.

Выводы по результатам расчетных исследований теплоотвода камеры БМ-П

Расчеты системы теплоотвода камеры БМ-П позволили обосновать вариант системы теплоотвода, который сделал возможным проведение исследований рекомбинаторов, превратив камеру БМ-П в универсальный стенд для экспериментальных исследований процессов, происходящих в камере БМ-П.

Заключение

Проведены расчетные исследования температурных полей камеры БМ-ЛР при различных режимах работы рекомбинатора.

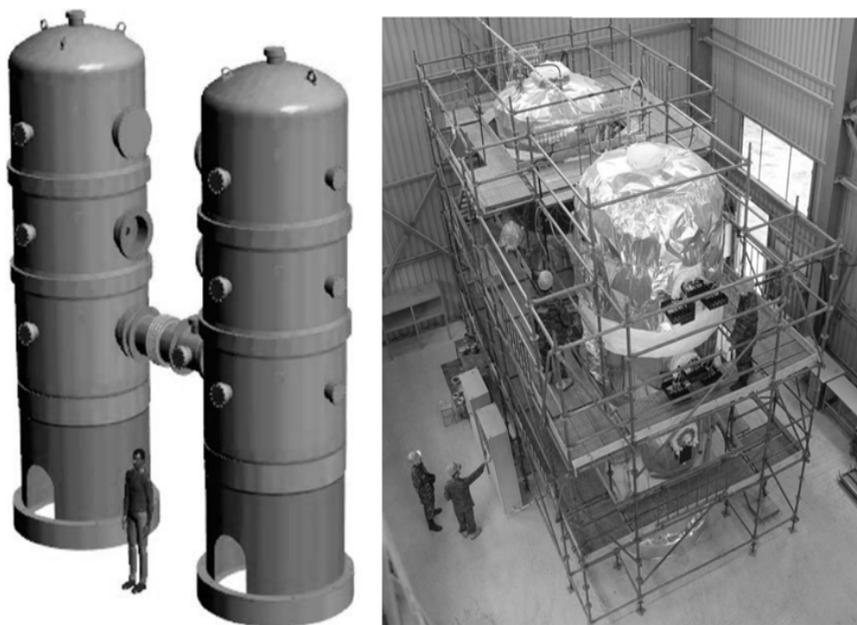


Рис. 2. Внешний вид камеры БМ-П

Анализируя представленные результаты, можно сделать вывод, что проводить исследования рекомбинатора в камере БМ-ЛР можно при концентрациях водорода до 3 %. При более высоких концентрациях водорода повышение температуры приводит к расплавлению поликарбонатного листа. Использование поликарбонатного листа связано с необходимостью наблюдения и видеофиксации процессов, проходящих в камере БМ-ЛР при дефлаграции водорода. Для исправления ситуации необходимо оснащение камеры БМ-ЛР системой теплоотвода, либо проведения исследования рекомбинаторов при более высоких концентрациях водорода в камере БМ-П.

Результаты расчетных исследований системы теплоотвода показали, что использование калорифера, размещенного внутри камеры с теплоносителем вода, является эффективным методом охлаждения камеры БМ-П. Для повышения эффективности можно использовать второй калорифер, расположенный за пределами камеры, что обеспечит теплоотдачу от теплоносителя в окружающую среду.

Литература

1. Кириллов И. А. Обеспечение водородной безопасности на атомных электростанциях с водоохлаждаемыми реакторными установками. Ядерная и радиационная безопасность. 2017. № 2 (84).

2. Хизбулин А. М., Каменев М. А., Тюриков О. В. Расчетное моделирование развития тяжелой аварии с учетом влияния работы теплообменника на стратификацию водорода в защитной оболочке / 16-я конференции молодых специалистов по ядерным энергетическим установкам «КМС-2014» // Сборник материалов. Нижний Новгород: ОАО «ОКБМ Африкантов», 2014.

3. Тарасов О. В. Разработка и верификация модели рекомбинаторов РВК-500,-1000, для моделирования защитной оболочки АЭС с ВВЭР методами вычислительной гидродинамики // Атомная энергия. 2016. Т. 121. Вып. 3.

4. Рякин А. А., Горбачева Е. С., Койнов О. В., Никульшин М. В., Путилин О. С. Расчетные исследования теплового состояния испытательных стендов БМ-П и БМ-ЛР / VI Всероссийская научно-практическая конференция «Научная сессия НИЯУ МИФИ» // Сборник тезисов. Снежинск: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ», 2017.

5. Лавренюк И. В., Симоненко В. А., Безгодов Е. В. Экспериментальное исследование стратификации и горения ВПГС / Международная конференция «XIII Забабахинские научные чтения» // Сборник тезисов. Снежинск: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2016.