

# СИСТЕМЫ РЕГИСТРАЦИИ И ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ МЕТОДИКИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ СТЕНДОВ ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ В ИНТЕРЕСАХ ВОДОРОДНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ АТОМНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ С ВОДО-ВОДЯНЫМИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИМИ РЕАКТОРАМИ

*А. А. Тараканов, Е. В. Безгодов, Ю. Ф. Давлетчин, Д. Л. Мошкин,  
М. В. Никифоров, С. Д. Пасюков, И. А. Попов*

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. академика Е. И. Забабахина», г. Снежинск Челябинской обл.

## Введение

На атомных электростанциях, оснащенных водо-водяными реакторами причиной возникновения тяжелой аварии является нарушение проектных режимов охлаждения активной зоны реактора из-за разрыва трубопровода первого контура или полного обесточивания АЭС с потерей электропитания собственных нужд и не запуском основных и резервных дизель-генераторов [1]. В этих случаях, процесс развития тяжелой аварии можно разделить на четыре фазы:

- разогрев и последующее расплавление активной зоны;
- выпаривание остаточной воды в корпусе реактора;
- разогрев и расплавление корпуса реактора;
- проникновение расплава в бетон защитной оболочки.

В результате нарушения целостности реакторной зоны создаются условия для выделения водорода в объеме под защитной оболочкой, прежде всего, за счет окисления циркония в топливных оболочках. Водород, распределяясь в объеме под защитной оболочкой, смешивается с воздухом, водяным паром и другими продуктами окисления расплавов компонентов разрушающейся реакторной зоны. Таким образом, под защитной оболочкой и в помещениях образуются области, заполненные водородосодержащими смесями, способными к воспламенению, при относительно небольших внешних энергозатратах. В дальнейшем процесс может развиваться следующим образом: горение затухает; по горючей смеси распространяется медленная или быстрая волна горения; реализуется переход от дозвукового горения к детонации; возможно возбуждение детонации в результате интенсивного энергозатражения. Все эти проявления дополнительного энерговыделения за счет химической реакции горения водорода могут привести к разгерметизации защитной оболочки АЭС и обусловить опасное радиоактивное заражение больших территорий [2].

Практика проектирования АЭС с водо-водяным энергетическим реактором требует достоверного предсказания распространения в объеме защитной оболочки АЭС водородосодержащих парогазовых смесей, условий возникновения горения этих смесей и моделирования воздействия и последствий горения на защитную оболочку в процессе тяжелых аварий.

Комплекс стендов для изучения водородной безопасности АЭС, расположенный на испытательном полигоне РФЯЦ-ВНИИТФ, предназначен для исследования процессов поступления пара, водорода и других газов в помещения защитной оболочки реактора, расслоения и перемешивания газовых составов, воспламенения и распространения пламени при условиях, характерных для тяжелых аварий [3].

В состав комплекса входит «легкая» БМ-Л и «прочная» БМ-П экспериментальные установки.

## Экспериментальная установка БМ-Л

С целью выполнения исследований в интересах водородной безопасности на испытательном полигоне РФЯЦ-ВНИИТФ создана экспериментальная установка (ЭУ) БМ-Л, конструкция которой повторяла геометрию смежных помещений АЭС – главного циркуляционного насоса (ГЦН) и парогенератора (ПГ) в масштабе 1:10. Стенд состоял из внутренней и внешней камеры. Внутренняя камера построена из бруса и прозрачного монолитного поликарбоната, для обеспечения оптической регистрации. Внешняя камера, утеплена листами минеральной ваты, для поддержания требуемого градиента температур внутренней камеры. При создании внутренней камеры учтены все тонкости геометрии помещений и расположения оборудования внутри них: установлены макеты ГЦН и ПГ, выполнены в масштабе существующие проемы и перегородки. Установка БМ-Л предназначена для проведения экспериментов с водородопарогазовыми смесями (ВПГС) при атмосферном давлении и температуре выше 100 °С. Изображение внешнего вида экспериментальной установки БМ-Л представлено на рис. 1.

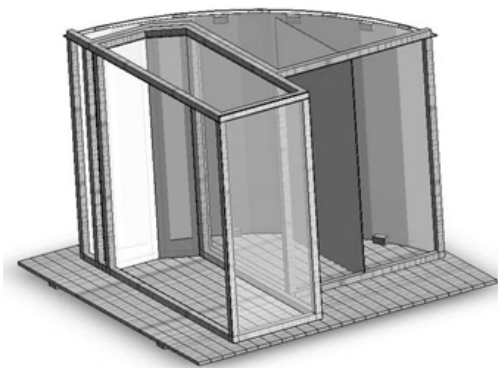


Рис. 1. Внешний вид экспериментальной установки БМ-Л

После серии успешных испытаний по истечению ВПГС внутри помещений экспериментальная установка БМ-Л была модифицирована под испытания опытных образцов пассивных каталитических рекомбинаторов водорода (ПКРВ), применяемых на АЭС. За основу был взят 5-тонный железнодорожный контейнер. К одной из сторон контейнера приварена рамка для крепления съемного поликарбонатного листа, через который производится видеорегистрация экспериментов. Внутренняя и внешняя камеры оснащены клапаном для одностороннего выхода газов из установки наружу, измерительными методиками, трубами для подачи ВПГС, размещенными в отверстиях пола внутренней камеры, устройством открытия/закрытия входов рекомбинатора с удаленным управлением и вентиляторами для обеспечения однородного газового состава. Изображение внешнего вида экспериментальной установки БМ-Л для испытаний ПКРВ представлено на рис. 2.

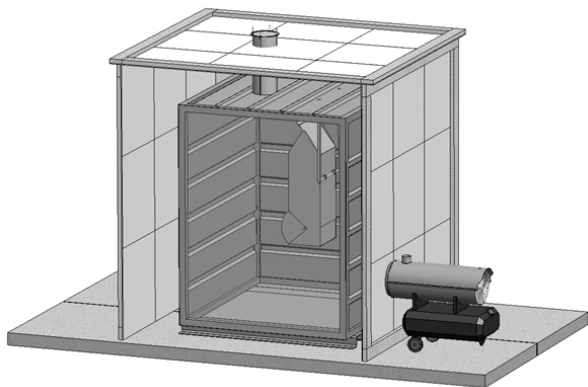


Рис. 2. Внешний вид экспериментальной установки БМ-Л для испытаний ПКРВ

### Экспериментальная установка БМ-П

Установка БМ-П предназначена для проведения экспериментов с ВПГС при температуре до 200 °С и давлении до 0,5 МПа. В ее состав входят две металлические камеры, высотой 5 метров и диаметром 2 метра, соединенных между собой съемным сильфоном с проходным диаметром 500 мм.

На ЭУ расположены два типа люков: диаметром 200 и 500 мм, предназначенные для ввода систем регистрации внутрь камеры, а также для визуализации процессов сквозь смотровые иллюминаторы. На рис. 3. представлено изображение внешнего вида экспериментальной установки БМ-П.

ЭУ оборудована системой нагрева и термостабилизации. Нагрев и поддержание необходимой температуры установки производится с помощью нагревательного кабеля и многоканальных регуляторов температуры. Регулировка мощности производится индивидуально на каждом нагревательном элементе. Суммарная мощность системы нагрева камеры 80 кВт. ЭУ аттестована в соответствии с ГОСТ Р 8.568-97 и ГОСТ РВ 0008-002-2013.



Рис. 3. Внешний вид экспериментальной установки БМ-П

### Система управления технологическим оборудованием и газонаполнением экспериментальных установок

Система управления технологическим оборудованием и газонаполнением ЭУ обеспечивает управление компрессорной установкой, парогенератором, вентиляторами, устройством открытия/закрытия входов рекомбинатора, а также обеспечивает заданные темпы поступления газов ( $H_2$ ,  $O_2$ , пар) в ЭУ и выполняет измерение их расходов. Работа осуществляется в автоматическом режиме, с использованием программно-управляемого пульта дистанционного управления. В данный момент ведется работа по созданию программного обеспечения для мониторинга, анализа, архивирования и постобработки информации, поступающей с измерительной аппаратуры стенда при проведении испытаний.

### Системы регистрации экспериментальных установок

#### *Измерение температурных полей*

Для измерения температурных полей при проведении экспериментов применяется аттестованная методика измерений (МИ). МИ предназначена для

измерений температуры парогазовой среды в диапазоне от минус 25 до плюс 800 °С, и поверхности ЭУ в диапазоне от минус 25 до плюс 600 °С в стационарном и динамическом режимах. В ее составе используются десять 12-канальных регистраторов. Период опроса аналоговых входов регистратора составляет 1 с. Измерение температуры производится контактным методом с помощью термоэлектрических преобразователей типа ХК(Л) и ХА(К), установленных внутри и на поверхности экспериментальной установки.

#### *Система статического и динамического давления*

Регистрация статического давления внутри камеры производится с использованием цифрового прецизионного манометра АИР-30. Цифровой выход используется для связи преобразователя с персональным компьютером.

Регистрация динамического (квазистатического) давления парогазовой среды внутри камер установок осуществляется с помощью аттестованной МИ. МИ предназначена для дистанционного измерения максимального избыточного давления в диапазоне от 250 до 2500 кПа. Частота дискретизации аналого-цифрового преобразователя датчика давления составляет 1 кГц.

#### *Визуализация процессов горения ВПГС*

Для визуализации горения ВПГС внутри ЭУ был выбран метод теневой съемки на тильном экране из световозвращающей пленки в расходящемся пучке света. Съемка осуществляется высокоскоростными видеокамерами. Пример высокоскоростной видеорегистрации горения ВПГС представлен на рис. 4.



Рис. 4. Пример высокоскоростной видеорегистрации горения ВПГС

#### *Система измерения относительной влажности*

Измерение относительной влажности при экспериментальных исследованиях осуществляется с помощью комплекса средств регистрации влажности РАСК2027, разработанного в РФЯЦ-ВНИИТФ. В его составе 24 датчика влажности и 6 устройств преобразования. Данные регистрируются и обрабатываются на персональном компьютере с помощью специализированного программного обеспечения.

МИ относительной влажности аттестована и предназначена для многоточечного непрерывного измерения значений относительной влажности в ЭУ при проведении опытов в температурном диапазоне от 23 до 150 °С и относительной влажности до 95 %.

#### *Система дискретного контроля газового состава (ДСКГС)*

ДСКГС предназначена для многоточечного измерения концентрации газов (водорода, кислорода, азота) в ЭУ в процессе проведения опытов. Обеспечивается одновременный отбор газа в различных точках ЭУ, или последовательный из одной точки с заданными интервалами. Количество каналов: 30. Полученные пробы анализируются с помощью хроматографа. МИ аттестована и применяется для определения объемной доли водорода в диапазоне от 0,1 до 40 %, кислорода – от 0,1 до 21 %, азота – от 1,0 до 100 %, в температурном диапазоне от 20 до 160 °С, абсолютном давлении от 90 до 500 кПа и концентрации водяного пара от 1,0 до 70 %.

#### *Система непрерывного контроля газового состава (НСКГС)*

Непрерывный контроль газового состава внутри ЭУ осуществляется с помощью НСКГС, разработанной в РФЯЦ-ВНИИТФ. МИ аттестована и применяется для определения концентрации водорода, кислорода и азота в ВПГС с использованием электрохимических датчиков в диапазоне:

- по водороду: от 0,2 до 20 %;
- по кислороду: от 5 до 30 %;

Количество каналов: 3.

## **Заключение**

В рамках работ по исследованию водородной безопасности АЭС на испытательном полигоне РФЯЦ-ВНИИТФ был создан комплекс стендов, предназначенный для получения экспериментальных данных о процессах, характерных для тяжелых аварий на АЭС, и при условиях, близких к ним. Также, для выполнения данных работ, было разработано специализированное измерительное оборудование, не имеющее аналогов в РФ.

ЭУ БМ-П состоит из двух связанных камер объемом 15 м<sup>3</sup> и позволяет моделировать процессы поступления пара, водорода, других газов в помещения защитной оболочки реактора при температуре до 200 °С, давлении до 0,5 МПа, а также расслоения и перемешивания газовых составов, их воспламенение и распространение пламени.

ЭУ БМ-Л ориентирована на проведение экспериментов, с широкими возможностями оптической регистрации, при температурах выше 100 °С и давлениях близких к атмосферным.

Измерительные методики, входящие в состав экспериментальных установок, позволяют получать информацию о температуре, влажности, газовом составе и давлении формируемой газовой среды. Для визуализации горения ВПГС используются высокоскоростные видеокамеры.

В настоящее время ведется работа по совершенствованию существующих методик измерений, расширению условий их применения и снижению погрешности измерений. Предполагается дооснащение стенда дополнительной измерительной аппаратурой и разработкой методик измерений на ее основе.

### Литература

1. Артамонов Н. В., Сидоров А. С. Изменение размножающих свойств реактора типа ВВЭР-1000 при прохождении запроектной аварии с расплавлением активной зоны // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Обеспечение безопасности АЭС. 2012. № 11. С. 102–111.

2. Безгодов Е. В., Иванов А. С., Крюков В. М., Симоненко В. А., Шульц О. В., Павленко А. В., Фролов Д. В., Ушков А. А. Результаты и задачи исследований динамических процессов в водородосодержащих средах с целью противодействия тяжелым авариям на АЭС с ВВЭР / Международная конференция «XIV Забабахинские научные чтения» // Сборник материалов. Снежинск: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ». 2019. С. 192–193.

3. Тараканов А. А. Измерительные методики и системы стенда для выполнения исследований в интересах водородной безопасности АЭС с ВВЭР» / VII научный семинар «Моделирование технологий ядерного топливного цикла» // Сборник материалов. Снежинск: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ». 2018. С. 31.