

рованным поглотителем, потому отличия в сравниваемых величинах при расчете с помощью более совершенных моделей могут измениться. Но качественно вывод останется неизменным, поскольку опирается на физические особенности процессов в твэлах с различным размещением выгорающего поглотителя в них.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пономарев-Степной Н.Н., Кузнецов В.В., Гагаринский А.Ю. и др. Будущее ядерной энергетики: энергия, экология, безопасность. — Атомная энергия, 2002, т. 93, вып. 5, с. 327—348.
2. Schlieck M., Berger H.-D., Neufert A. Optimized gadolinia concepts for advanced in-core fuel management in PWRs. — Nucl. Engng Design, 2001, v. 205, с. 191—198.
3. Fukushima S. The effect of gadolinium content on the thermal conductivity of near-stoichiometric (U, Gd)O₂ solid solutions. — J. Nucl. Mater., 1982, v. 105, p. 201—210.
4. Belousov N., Bychkov S., Marchuk Y. e.a. The code GETERA for cell and polycell calculations. Models and capabilities. — In: Proc. of the 1992 Topical Meeting on Advances in Reactor Physics. Charleston, USA, 8—11 March, 1992, v. 2, p. 516—523.
5. Белоусов Н.И., Бычков С.А., Пряничников А.В. Использование метода вероятностей первых столкновений для расчета ячеек реакторов со сложной геометрией. — Инж. физика, 2002, № 4, с. 15—18.
6. Бибилашвили Ю.К., Годин Ю.Г., Кулешов А.В. Исследование теплофизических и механических свойств уран-гадолиниевого оксидного топлива: Препринт ИАЭ-6138/11, 1999. 25 с.

Поступила в Редакцию 14.10.05

УДК 621.039.58

РАЗРАБОТКА И ОБОСНОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ УДАЛЕНИЯ НЕКОНДЕНСИРУЮЩИХСЯ ГАЗОВ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ РАБОТОСПОСОБНОСТИ СИСТЕМЫ ПАССИВНОГО ОТВОДА ТЕПЛА

*Беркович В.М., Коришунов А.С., Таранов Г.С. (Атомэнергопроект),
Калякин С.Г., Морозов А.В., Ремизов О.В. (ГНЦ РФ — ФЭИ им. А.И. Лейпунского)*

Для повышения безопасности ВВЭР-1000 проекта АЭС-92 в структуре систем безопасности предусматривается сочетание как традиционных активных, так и пассивных систем, не требующих для своей работы источников электроснабжения. К пассивным системам безопасности, предназначенным для преодоления аварийных течей первого контура реакторной установки с наложением потери источников переменного тока на АЭС, относятся гидроемкости второй ступени и система пассивного отвода тепла [1]. В случае течи в первом контуре система пассивного отвода тепла переводит парогенераторы на работу в режиме конденсации пара первого контура, поступающего в трубчатку из реактора. В результате этого дополнительно к воде, подаваемой гидроемкостями второй ступени, в первый контур поступает конденсат из парогенераторов.

Водяной объем гидроемкостей второй ступени с учетом конденсирующей способности парогенераторов выбран таким образом, чтобы в течение времени не менее 1 сут поддерживать в корпусе реактора массу теплоносителя, необходимую для надежного охлаждения топлива. Кроме того, под защитной оболочкой имеется теплоноситель объемом около 700 м³, который находится в бассейне выдержки, распо-

ложенном между отметками 23 и 31,7 м. Указанного запаса достаточно для подачи в течение 48 ч теплоносителя через трубы, подключающие гидроемкости к корпусу реактора после исчерпания запаса теплоносителя в гидроемкостях второй ступени. Таким образом, техническими решениями, реализованными в проекте АЭС-92, предусмотрены под защитной оболочкой объемы теплоносителя, достаточные для отвода энерговыделения от активной зоны в течение более 72 ч при условии одновременной эффективной работы системы пассивного отвода тепла.

Следует особо отметить, что рассеяние энергии благодаря работе этой системы поддерживает параметры парогазовой среды в защитной оболочке на уровне ниже проектных значений, что служит гарантией локализующих функций защитной оболочки. Поэтому надежный теплоотвод является важнейшим условием эффективности применяемых в проекте АЭС-92 пассивных систем безопасности.

При проектном обосновании были проанализированы причины отказа выполнения системой пассивного отвода тепла проектной функции. Результаты показали, что при принятом превышении установленной мощности теплообменников-конденсаторов над проектной и реализованной конструктивной защищенностью воздушного тракта от ветрового воздействия основной причиной отказа системы пассивного отвода тепла от реакторной установки может явиться потеря конденсационной способности парогенераторов вследствие накопления в них неконденсирующихся газов.

В рамках выполнения указанного анализа было проведено численное моделирование взаимосвязанных процессов в реакторной установке, защитной оболочке и системе пассивного отвода тепла с помощью кода SCDAP/RELAP в сочетании с кодом АНГАР, процессов газогенерации в реакторной установке — по программе МОРАВА Н2. Расчеты показали, что длительное непринятие мер по удалению неконденсируемой в трубчатке парогазовой смеси может привести к потере конденсационной способности парогенератора. Однако благодаря значительной поверхности трубного пучка парогенераторов и наличию связи верхней части гидроемкостей второй ступени с коллектором действия по удалению неконденсируемой смеси не относятся к числу срочных мер. Для удаления неконденсируемой парогазовой смеси в долгосрочном аспекте в проекте предусмотрена система аварийного газоудаления.

Процессы и режимы работы системы аварийного газоудаления. В процессе газоудаления неконденсируемой смеси имеются два этапа. Первый реализуется при работе гидроемкостей второй ступени в течение первых 24 ч (при большой течи) или более длительного времени (при средних и малых течах) после начала аварии с разгерметизацией первого контура реакторной установки. Во время этого этапа сдувка неконденсирующихся газов осуществляется путем самопроизвольного ухода неконденсируемой парогазовой смеси в объем гидроемкостей второй ступени. Парогазовая смесь отбирается из холодных коллекторов и по системе трубопроводов направляется в емкости, входящие в состав гидроемкостей второй ступени (рис. 1). Объем среды, отбираемой из коллекторов парогенераторов, превышает объемную скорость образования неконденсируемой смеси. Длительность первого этапа работы определяется регламентным временем работы гидроемкостей второй ступени, в течение которого происходит полное опустошение восьми гидроемкостей объемом 120 м^3 каждая путем слива охлаждающей воды в активную зону реактора.

После окончания слива давление в объеме гидроемкостей и в первом контуре выравнивается, вследствие чего поступление парогазовой смеси из трубчатки парогенератора в объем гидроемкостей прекращается. Для дальнейшего отвода неконденсирующихся газов (в течение времени до 72 ч) предполагается использование одной из следующих технологических схем:

подача неконденсирующихся газов в объем опорожненных гидроемкостей второй ступени;

отвод неконденсирующихся газов за счет использования азота высокого давления из гидроемкостей первой ступени.

Подача газа в объем опорожненных гидроемкостей второй ступени. В этом слу-

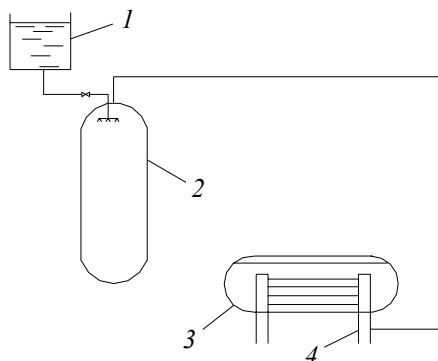
чае для обеспечения расхода парогазовой смеси из трубчатки необходимо снизить давление в гидроемкостях. Это достигается впрыском холодной ($T = 40^\circ\text{C}$) воды из дополнительных баков. Относительно низкую температуру воды предполагается поддерживать за счет качественной теплоизоляции дополнительных баков. Холодная вода может подаваться как автоматически, так и по команде оператора.

Отвод неконденсирующихся газов за счет использования азота высокого давления из гидроемкостей первой ступени. В этом случае для обеспечения отвода неконденсирующихся газов предполагается использовать азот высокого давления, содержащийся в сработавших гидроемкостях первой ступени. Объем газа в каждой из четырех гидроемкостей первой ступени равен 55 м^3 при давлении около 1,5 МПа, что соответствует 825 нм^3 . Организовав подачу этого азота на эжектор, можно с его помощью обеспечить отсос парогазовой среды из коллекторов парогенераторов, используя линии воздушников (рис. 2).

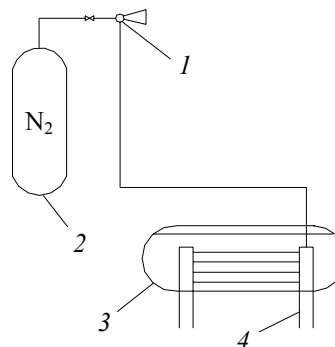
Крупномасштабный стенд ГЕ-2М. Для экспериментальной проверки характеристик отравления трубчатки парогенератора неконденсирующимися газами и оптимизации управления их сдувкой в ФЭИ создан крупномасштабный стенд ГЕ-2М, с помощью которого определяются граничные условия процесса и уточняются характеристики выбранной технологии [2].

На рис. 3 приведена принципиальная технологическая схема стенда ГЕ-2М. В состав стенда, предназначенного для исследования влияния неконденсирующихся газов на конденсационную мощность парогенератора, входят:

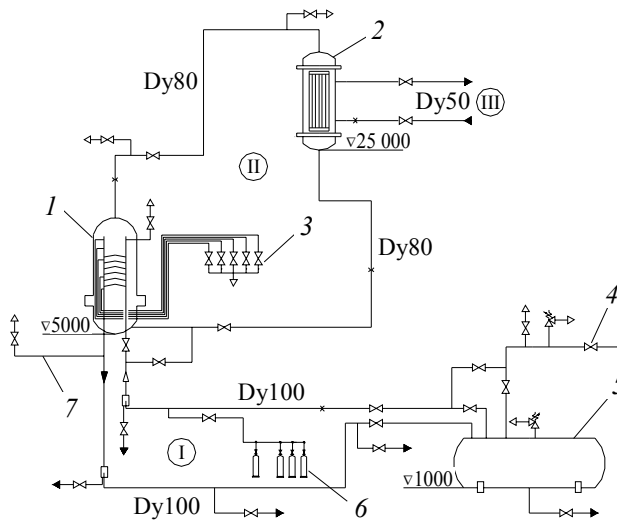
бак-аккумулятор Б₃ ($V_3 = 16\text{ м}^3$) с системой подачи пара от ТЭЦ;



Р и с. 1. Схема системы сдувки неконденсирующихся газов путем их подачи в объем опорожненных гидроемкостей второй ступени: 1 — бак запаса холодной воды; 2 — гидроемкость второй ступени; 3 — парогенератор; 4 — холодный коллектор парогенератора



Р и с. 2. Схема системы сдувки неконденсирующихся газов за счет использования азота высокого давления из гидроемкостей первой ступени: 1 — эжектор; 2 — гидроемкость первой ступени; 3 — парогенератор; 4 — холодный коллектор парогенератора



Р и с. 3. Принципиальная технологическая схема стенда ГЕ-2М: 1 — модель парогенератора; 2 — имитатор теплообменника системы пассивного отвода тепла; 3 — система отбора проб парогазовой среды по высоте трубки парогенератора; 4 — подача пара от ТЭЦ; 5 — бак-аккумулятор; 6 — система ввода неконденсирующегося газа; 7 — сдвук газа в гидроемкость

Для реализации описанных схем организации сдувки неконденсирующихся газов стенд ГЕ-2М дополняется необходимым технологическим оборудованием. Для первого варианта с конденсацией пара в объеме гидроемкостей второй ступени устанавливается дополнительный бак с запасом воды объемом $\sim 1 \text{ м}^3$, подсоединенный к верхней точке гидроемкостей. Для второго варианта с использованием механизма эжекции устанавливаются баллоны с азотом соответствующего давления.

Система измерений на стенде ГЕ-2М. Контрольно-измерительные приборы, установленные на стенде ГЕ-2М, позволяют как при подготовке к экспериментам, так и при проведении опытов регистрировать следующие основные параметры установки:

давление среды первого контура в паропроводе от ТЭЦ на входе в здание, в баке Б₃ и на выходе из модели парогенератора (в районе подключения к холодному коллектору трубопровода сдувки парогазовой смеси);

давление среды второго контура на выходе из модели парогенератора и на входе в имитатор системы пассивного отвода тепла;

температуру среды первого контура в паропроводе от ТЭЦ на входе в здание, в баке Б₃, а также в районе установки дроссельной шайбы;

температуру среды второго контура на выходе из модели парогенератора, на входе/выходе имитатора теплообменника системы пассивного отвода тепла;

температуру технической воды третьего контура на входе/выходе из трубки имитатора теплообменника системы пассивного отвода тепла;

расходы сред первого контура (пар) на выходе из бака Б₃, второго контура на выходе (пар) и входе (вода) модели парогенератора, третьего контура (вода) на входе в имитатор системы пассивного отвода тепла;

модель парогенератора, разработанная на основе имеющегося проекта ПГВ-1000 реакторной установки В-392, масштаб модели 1:46;

имитатор теплообменника пассивной системы отвода тепла, охлаждаемый технической водой.

Основное оборудование стенда связано между собой трубопроводами Ду80 и Ду100 и оснащено запорно-отсечной арматурой.

Стенд ГЕ-2М оснащен системами, позволяющими подавать в первый контур неконденсирующийся газ, отбирать пробы парогазовой среды по высоте трубки парогенератора, а также осуществлять ее сдвук из холодного коллектора.

уровень воды в баке Б₃, модели парогенератора, гидрозатворе первого контура, а также в опускном участке трубопровода второго контура.

На стенде предусмотрено измерение количества конденсата, образующегося в модели парогенератора и стекающего как по холодной, так и по горячей ветке первого контура, объемным методом, путем направления конденсата в мерные баки и контролем за изменением его уровня во времени. При заполнении мерного бака будет проводиться его периодический дренаж.

Давление в контуре регистрируется с помощью дифференциальных преобразователей МЕТРАН, температура измеряется кабельными термопарами типа КТМС размером 1—1,5 мм, расход сред предполагается контролировать с помощью измерения перепада на сужающих устройствах приборами типа МЕТРАН. Частота опроса измерительных каналов системы сбора будет составлять не менее 1 Гц. Кроме того, модель парогенератора оснащена более чем 100 термопарами, позволяющими контролировать параметры среды первого и второго контуров стенда как в трубчатке, так и в межтрубном пространстве парогенератора.

Проведение экспериментов на стенде ГЕ-2М. Целью проведения экспериментов на стенде ГЕ-2М является изучение влияния накопления неконденсирующихся газов в трубчатке парогенератора на его конденсационную мощность, а также оценка эффективности системы сдувки неконденсирующихся газов из холодного коллектора.

Расчетные оценки и опыты первого этапа экспериментальных исследований показали, что действия по удалению неконденсируемой смеси не относятся к числу срочных мер и при консервативно заданной сдувке парогазовой смеси с каждого парогенератора около 10 л/с схема с подачей неконденсирующихся газов в объем опорожненных гидроемкостей второй ступени позволяет ее обеспечить в течение 48 ч при объеме дополнительного бака для каждой гидроемкости не более 7 м³. При тех же условиях при использовании схемы с отводом неконденсирующихся газов за счет применения азота высокого давления из гидроемкостей первой ступени для сдувки в течение 48 ч требуется около 600 нм³, что меньше объема запасенного газа.

В целях минимизации затрат на дополнительное оборудование и выбора наиболее эффективной схемы сдувки планируется провести второй этап экспериментальных работ, в которых должна быть уточнена общая сдувка за 48 ч после опорожнения гидроемкостей второй ступени, уточнен ее расход и изменение в течение указанного периода, а также оптимизированы требования к характеристикам выбранной схемы.

В связи с этим представляется необходимым проведение трех серий экспериментов:

- эксперименты по исследованию конденсации пара в трубчатке парогенератора в отсутствие неконденсирующегося газа;

- опыты по изучению конденсации пара в модели парогенератора при наличии неконденсирующегося газа без работы системы сдувки;

- эксперименты по изучению процессов конденсации пара в модели парогенератора при наличии неконденсирующегося газа с работающей системой аварийного

газоудаления и определение минимально необходимой расходной характеристики системы аварийного газоудаления.

Во всех этих экспериментах важным является поддержание стационарного состояния параметров среды первого контура.

Эксперименты с чистым паром (без неконденсирующихся газов). Задачей данной серии экспериментов является определение конденсационной мощности модели парогенератора стенда ГЕ-2М при отсутствии накопления неконденсирующихся газов. Целью опытов является определение зависимости конденсационной мощности модели парогенератора от расхода охлаждающей воды на модели системы пассивного отвода тепла в диапазоне от мощности тепловых потерь $N_{\text{пот}}$ до максимальной $N_{\text{макс}}$ для заданного давления в первом контуре стенда. В результате серии опытов после обработки экспериментальных данных необходимо получить семейство кривых, описывающих зависимость конденсационной мощности $N_{\text{кон}}$ от давления второго контура стенда P_2 .

Эксперименты с парогазовой смесью без работы системы аварийного газоудаления. Целью этой серии экспериментов является оценка влияния неконденсирующихся газов в первом контуре стенда ГЕ-2М на конденсационную мощность модели парогенератора. В результате экспериментов необходимо получить зависимость, описывающую снижение конденсационной мощности парогенератора при фиксированных давлении в трубчатке модели парогенератора P_1 и расходе охлаждающей воды на модели системы пассивного отвода тепла.

В дальнейшем проводятся аналогичные эксперименты при другом давлении первого контура из рабочего диапазона. В результате серии опытов после обработки экспериментальных данных необходимо получить зависимости, описывающие изменение конденсационной мощности парогенератора $N_{\text{кон}}$ по мере его отравления.

Эксперименты с парогазовой смесью со сдувкой. Целью данной серии экспериментов является оценка влияния сдувки неконденсирующихся газов из первого контура стенда на конденсационную мощность модели парогенератора и определение минимально необходимой расходной характеристики системы аварийного газоудаления. В результате эксперимента будет получено семейство кривых, описывающих изменение конденсационной мощности парогенератора в зависимости от расхода парогазовой смеси на сдувку $G_{\text{сп}}$ (при фиксированных давлении в первом контуре стенда P_1 и расходе охлаждающей воды на модели системы пассивного отвода тепла G_3).

Задачей именно этого этапа исследований является уточнение характеристик выбранной сдувки неконденсирующихся газов из трубчатки парогенератора и определение необходимых параметров процесса.

Заключение. При условии сохранения конденсационной способности парогенераторов запасы теплоносителя, предусмотренные проектом АЭС-92 под защитной оболочкой, при одновременной работе системы пассивного отвода тепла обеспечивают надежный длительностью более 72 ч отвод остаточного энерговыделения от ТВЭЛов активной зоны при аварийных течах с потерей источников переменного тока на АЭС. В целях исключения отравления парогенераторов неконденсирующимися газами и поддержания мощности теплоотвода от реакторной установки с помощью систем пассивного отвода тепла в проекте используется система аварийного

газоудаления неконденсируемой смеси. Расчетные и экспериментальные работы показали, что действия по удалению неконденсируемой смеси не относятся к числу срочных мер, а предложенные две схемы аварийного газоудаления обеспечивают сдвиг неконденсирующихся газов из холодных коллекторов парогенераторов даже при консервативно заданной сдвиге. Для оптимизации характеристик и выбора окончательной схемы запланировано экспериментальное исследование совместной работы системы пассивного отвода тепла с парогенератором, конденсирующим парогазовую смесь. Исследования будут проводиться на крупномасштабном стенде ГЕ-2М, который создан в ФЭИ для комплексного изучения функциональной работоспособности и взаимодействия пассивных систем безопасности, применяемых в проектах АЭС с ВВЭР нового поколения. Приведенная в статье методика исследований на стенде ГЕ-2М позволит выбрать оптимальные способы сдвига неконденсирующихся газов из трубчатки парогенератора, уточнить ее расходную характеристику.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Беркович В.М., Малышев А.Б., Таранов Г.С. и др. Влияние пассивных систем АЭС нового поколения на обеспечение локализирующих функций контайнмента. — Труды АЭП, 2002, вып. 3, с. 3—14.
2. Ефанов А.Д., Драгунов Ю.Г., Беркович В.М. и др. Крупномасштабный полнотемпературный гидравлический стенд ГЕ-2М для исследований совместной работы пассивных систем безопасности в реакторной установке ВВЭР-1000. — В сб.: 3-я научно-техн. конф. «Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР». Подольск, ОКБ «Гидропресс», 2003, т. 5, с. 90—93.

Поступила в Редакцию 21.01.06

УДК 621.039.577+541.15

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОДНО-ХИМИЧЕСКОГО РЕЖИМА ПЕРВОГО КОНТУРА ЯЭУ С ДВУХФАЗНЫМ ВОДНЫМ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕМ

*Лукашенко М.Л., Буланов А.В., Верховская А.О., Воробьев Ю.Б.,
Карнаухов В.Е., Степанов О.Е. (РНЦ «Курчатовский ин-т»),
Пена В.Н. (НИКИЭТ им. Н.А. Доллежалея),
Кабакчи С.А. (НИФХИ им. Л.Я. Карпова)*

Создание инновационных ЯЭУ с двухфазным теплоносителем связано с разработкой моделей, методов и программ для обоснования водно-химических режимов с заданными параметрами. Для этого необходимо описать:

влияние топологии и неконденсирующихся газов на межфазный массоперенос и транспортировку компонентов теплоносителя по первому контуру ЯЭУ;

радиационно-химические превращения водного теплоносителя первого контура с учетом состава реакторного излучения и теплофизических характеристик жидкой и паровой фаз;

пограничные процессы в системе водный теплоноситель—конструкционный материал первого контура при заданных радиационных, теплофизических и гидродинамических условиях в контуре, составе теплоносителя и свойствах материалов.