

ВЕРИФИКАЦИЯ РАСЧЕТНЫХ КОДОВ ТЕЧЬ-М И КОРСАР/ГП ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ЭКСПЕРИМЕНТОВ НА КРУПНОМАСШТАБНОМ СТЕНДЕ ГЕ2М-ПГ

А.В. Морозов*, **О.В. Ремизов***, **Д.С. Калякин***, **В.И. Асюнин****,
В.И. Щеколдин**, **С.И. Зайцев****, **М.О. Закутаев****

*ГНЦ РФ-Физико-энергетический институт им. А.И. Лейпунского, г. Обнинск

**ОАО ОКБ «Гидропресс», г. Подольск



Представлены результаты расчетов экспериментов, проведенных на стенде ГЕ2М-ПГ в ГНЦ РФ-ФЭИ. Эти эксперименты моделируют работу парогенератора при расхолаживании активной зоны реакторной установки ВВЭР проекта «АЭС-2006» за счет совместного действия пассивных систем безопасности ГЕ-2 и СПОТ при авариях с потерей теплоносителя первого контура. Целью работы являлось проведение посттестовых расчетов и верификация расчетных кодов ТЕЧЬ-М и КОРСАР/ГП в части моделирования теплообмена в модели парогенератора при низких тепловых потоках в присутствии неконденсирующихся газов и без них. По результатам верификации можно сделать вывод о способности расчетных кодов воспроизводить явления распространения неконденсирующихся газов с потоком теплоносителя, их накопление и влияние на теплообмен в трубном пучке парогенератора.

Ключевые слова: парогенератор ВВЭР, конденсация, неконденсирующиеся газы, расчетные коды.

Key words: VVER steam generator, condensation, noncondensable gases and computer codes.

ВВЕДЕНИЕ

В проекте «АЭС-2006» с реактором ВВЭР-1200 (головной блок сооружается на площадке Нововоронежской АЭС-2) при авариях с потерей теплоносителя первого контура предусматривается возможность расхолаживания активной зоны за счет действия только пассивных систем безопасности при отказе активных систем. В первые 24 часа после аварии расхолаживание осуществляется совместно системой пассивного залива активной зоны из гидроемкостей второй ступени (система ГЕ-2) и системой пассивного отвода тепла (СПОТ) [1].

СПОТ должна обеспечивать перевод парогенераторов в режим конденсации пара, поступающего из активной зоны, тем самым осуществляя подпитку первого контура. При переходе в данный режим величина тепловой нагрузки на теплооб-

© А.В. Морозов, О.В. Ремизов, Д.С. Калякин, В.И. Асюнин, В.И. Щеколдин, С.И. Зайцев, М.О. Закутаев, 2012

менную поверхность ПГ значительно снижается. При работе реакторной установки (РУ) в номинальном режиме среднее значение теплового потока в парогенераторах составляет 131 кВт/м². При переходе ПГ в конденсационный режим работы величина теплового потока, отводимого кипящей во втором контуре водой, не превышает 1,5 кВт/м².

В авариях с потерей теплоносителя первого контура в результате работы СПОТ парогенераторы начинают расхолаживать первый контур через 1,5–2 ч с момента начала аварии. Мощность тепловыделений в реакторе в этот период не превышает 40 МВт. Расхолаживание активной зоны в это время осуществляется в режиме выпаривания теплоносителя, и практически вся выделившаяся в топливе энергия идет на образование пара (не более 20 кг/с). Часть образовавшегося пара через «горячие» нитки неаварийных петель главного циркуляционного трубопровода (ГЦТ) поступает в парогенераторы и там конденсируется, т.е. остается в первом контуре. Количество сконденсированного пара определяется мощностью парогенераторов в этих условиях. Остальная часть образовавшегося в активной зоне пара уходит из первого контура в объем под защитной оболочкой (ЗО) через сечение разрыва. Для обеспечения стабильного расхолаживания активной зоны необходимо постоянно компенсировать количество ушедшего в ЗО пара подачей охлаждающей воды. Выполнение этой функции обеспечивает система ГЕ-2, содержащая в своих емкостях 960 м³ охлаждающей воды.

Таким образом, чем эффективнее парогенераторы будут конденсировать пар, тем больший период времени система ГЕ-2 будет выполнять свои функции, и обе системы (ГЕ-2 и СПОТ) вместе обеспечат охлаждение активной зоны. При этом, чем эффективнее парогенераторы будут конденсировать пар, тем меньше пара будет поступать из реакторной установки в ЗО, что обеспечит уровень давления, ниже допустимого значения в контейнменте.

На работу парогенератора в конденсационном режиме отрицательное влияние оказывает присутствие в первом контуре реактора неконденсирующихся газов: азота, растворенного в воде гидроемкостей первой ступени и поступающего в контур при их срабатывании, а также продуктов радиолиза воды и разложения гидразингидрата, растворенного в воде, поступающей из системы ГЕ-2. Накопление неконденсирующихся газов в трубчатке парогенератора может привести к ухудшению его конденсационной способности, вплоть до полного прекращения процесса конденсации.

Для экспериментального изучения работы парогенератора ВВЭР в конденсационном режиме при низких тепловых потоках с учетом влияния неконденсирующихся газов в ГНЦ РФ-ФЭИ был создан стенд ГЕ2М-ПГ.

КРУПНОМАСШТАБНЫЙ СТЕНД ГЕ2М-ПГ

Стенд ГЕ2М-ПГ является крупномасштабной экспериментальной установкой, предназначенной для исследования работоспособности пассивных систем безопасности, входящих в проект ВВЭР нового поколения [2]. В состав стенда входят модель парогенератора ВВЭР, бак-аккумулятор пара, имитатор теплообменника СПОТ, охлаждаемый технической водой, а также соединительные трубопроводы и арматура. На рисунке 1 показано размещение основного оборудования стенда, а на рис. 2 приведена принципиальная технологическая схема стенда ГЕ2М-ПГ.

Объемный масштаб модели парогенератора на стенде ГЕ2М-ПГ к парогенератору ВВЭР проекта «АЭС-2006» равен 1:48. Корпус парогенератора представляет собой вертикальный цилиндрический сосуд диаметром 1400 мм, состоящий из верхней и нижней частей, соединенных между собой фланцевым соединением.

Теплообменный пучок состоит из 248-ми горизонтальных змеевиковых труб, расположенных между двумя вертикальными коллекторами, и имеет 62 горизонтальных ряда труб с постоянным шагом 36,5 мм по высоте коллектора (2525 мм), причем каждый ряд состоит из четырех труб диаметром 16,0x1,5 мм, длиной 10,19 м. Каждый ряд труб имеет уклон от середины в сторону коллекторов с высотным перепадом 20 мм. Материал трубного пучка соответствует используемому в парогенераторах АЭС.

Основной измеряемой величиной в опытах являлся расход пара в модели парогенератора, который регистрировался вихревым расходомером. Кроме того, регистрировались давления и температуры по первому и второму контурам в нескольких точках, уровни жидкости в основных элементах стенда, а также парамет-

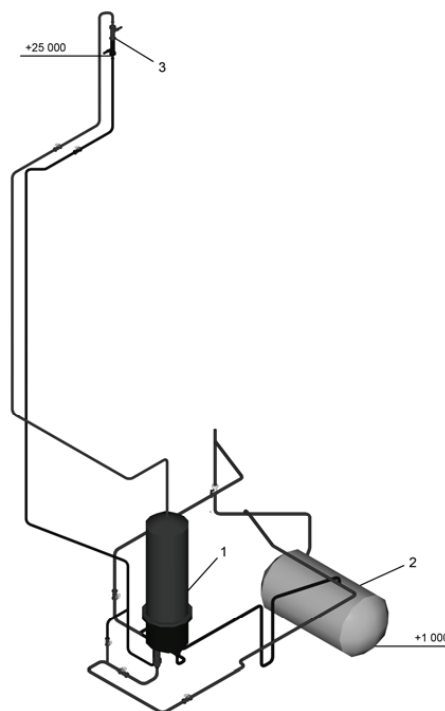


Рис. 1. Размещение основного оборудования на стенде ГЕ2М-ПГ: 1 – модель парогенератора; 2 – бак-аккумулятор пара; 3 – имитатор теплообменника СПОТ

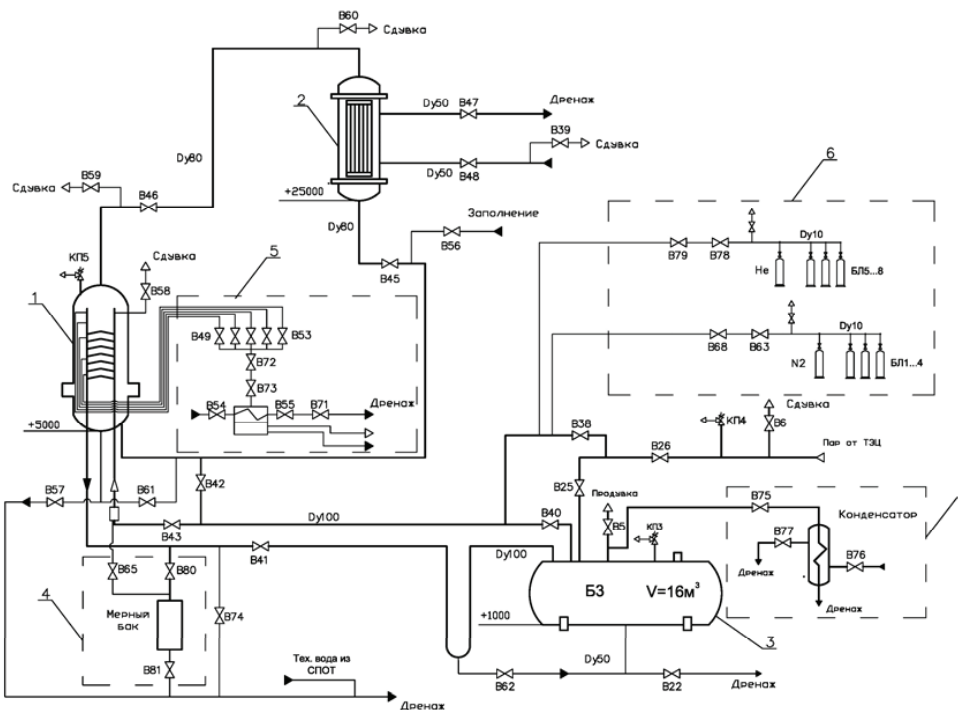


Рис. 2. Принципиальная технологическая схема стенда ГЕ2М-ПГ: 1 – модель парогенератора; 2 – имитатор теплообменника СПОТ; 3 – бак-аккумулятор пара; 4 – система сбора конденсата; 5 – система сдувки парогазовой смеси; 6 – система подачи неконденсирующихся газов; 7 – система поддержания давления

ры технической воды в имитаторе СПОТ. Модель парогенератора была оснащена более чем 100 кабельными термопарами $\varnothing 1,0$ мм, которыми контролировались параметры сред первого и второго контуров стенда как в трубчатке, так и в межтрубном пространстве.

Регистрацию давления по контурам стенда выполняли с помощью датчиков избыточного давления Метран-100-ДИ (класс точности 0,25). Измерение уровней воды на стенде производили гидростатическим методом с помощью датчиков разности давлений Метран-100-ДД (класс точности 0,25). Расход технической воды через теплообменник имитатора СПОТ контролировали с помощью измерения перепада давления на расходомерной шайбе прибором Метран-100-ДД. Измерение расхода пара на входе в модель ПГ осуществляли с помощью вихревого счетчика пара Метран-332 (основная погрешность 1,5%). Частота опроса измерительных каналов компьютерной системы сбора составляла 1 Гц.

Граничные и начальные условия экспериментов на стенде задавались на основании результатов расчетного моделирования процессов в реакторной установке. Анализ различных вариантов аварии с разрывом трубопроводов первого контура был выполнен по программе ТЕЧЬ-М-97 [3]. Исходя из результатов расчетов давление пара первого контура в опытах поддерживали в диапазоне 0,36–0,38 МПа.

Величина конденсационной мощности в экспериментах выбиралась исходя из экспериментальной зависимости мощности СПОТ от давления в парогенераторе, которая была получена на полномасштабной модели СПОТ в ОКБ «Гидропресс» [4].

В опытах с подачей парогазовой азотно-гелиевой смеси концентрация неконденсирующихся газов на входе в модель ПГ определялась исходя из расчетных данных по газогенерации в первом контуре АЭС в случае различных запроектных аварий. Вместо водорода в экспериментах на стенде использовался гелий, подававшийся с той же мольной концентрацией.

Величина объемной сдувки парогазовой смеси (ПГС) из холодного коллектора ПГ соответствовала объемному расходу на входе в гидроемкости ГЕ-2 (1,6–10 л/с) проекта «АЭС-2006», с учетом масштабного фактора стенда [5].

Программа экспериментов на стенде ГЕ2М-ПГ состояла из четырех этапов:

- эксперименты по исследованию конденсации пара в трубчатке ПГ в отсутствие неконденсирующегося газа;
- опыты по изучению конденсации пара в модели ПГ с подачей смеси неконденсирующихся газов;
- эксперименты по изучению процессов конденсации пара в модели ПГ в присутствии неконденсирующихся газов со сдувкой парогазовой смеси;
- эксперименты с использованием метода стационарных состояний.

Эксперименты на крупномасштабном стенде ГЕ2М-ПГ выполнялись по следующей методике. В начале эксперимента проводился последовательный прогрев паром бака БЗ, модели ПГ, теплообменника имитатора СПОТ, а также трубопроводов, образующих первый и второй контуры стенда. Прогрев стенда происходил до установления в контурах стенда стационарных параметров среды: давление $P_1 \approx P_2 = P_{\text{пар}}$, температура $t = t_s$. Определяющим показателем прогрева стенда служило равномерное тепловое поле по высоте объема котловой воды ПГ и стабильность давлений в первом и втором контурах стенда. Одновременно, с целью недопущения наличия в контурах паровоздушной смеси открытием соответствующих продувочных вентилей обеспечивалась сдувка воздуха из трубопроводов и основного оборудования стенда.

Затем с помощью арматуры на контуре технической воды устанавливались необходимые значения конденсационной мощности ПГ и давления среды в первом

и втором контурах стенда. После перехода стенда на новый стационарный режим производилась запись параметров с помощью системы сбора.

Далее в опытах с поступлением парогазовой смеси на вход модели ПГ начиналась подача неконденсирующихся газов с заданной концентрацией, а в экспериментах с отводом парогазовой смеси начиналась сдвух ПГС из трубчатки ПГ.

В экспериментах, проводимых по методике стационарных состояний, необходимо было получить три стационарных режима, характеризуемых величиной конденсационной мощности и перепадом температур между контурами стенда. Стационар № 1 достигался при работе на чистом паре. Стационары № 2 и 3 выдерживались при работе на парогазовой смеси со сдвух из холодного коллектора модели ПГ. В стационаре № 2 необходимо было добиться величины температурного напора, эквивалентного разнице температур в первом и втором контурах стенда в стационаре №1 на чистом паре. Критерием выхода на стационар №3 было достижение величины начальной конденсационной мощности, полученной в стационаре №1.

Изменение основных параметров стенда происходило за счет увеличения или уменьшения расхода технической воды через имитатор теплообменника СПОТ. Интервалы экспериментов, в которых происходило изменение $G_{\text{тех}}$ носят название переходных процессов № 1 и 2.

Экспериментальные данные, полученные на стенде GE2M-ПГ, использовались для верификации расчетных кодов ТЕЧЬ-М и КОРСАР/ГП.

РАСЧЕТНЫЙ КОД ТЕЧЬ-М

Программа ТЕЧЬ-М расчетного комплекса ТРАП-КС используется при обосновании безопасности АЭС с реакторами типа ВВЭР [6]. Она применяется для анализа изменения параметров теплоносителя в первом контуре и температурного режима в активной зоне в авариях, вызванных нарушением герметичности первого контура, включая режимы с разрывом главного циркуляционного трубопровода по полному сечению.

Код имеет полужесткую структуру построения нодализационной схемы, что обуславливает необходимость описания основных элементов РУ, не моделируемых в эксперименте GE2M-ПГ (активная зона, напорная и сборная камеры реактора). Тем не менее, удается успешно воссоздать условия эксперимента GE2M-ПГ, моделируя двусторонний разрыв на одной из ниток аварийной петли. В таком состоянии модели давление во всех элементах расчетной схемы близко к давлению в контейнменте, которое задается таблично в исходных данных к коду. В сборной камере находится насыщенный пар, который поступает в горячие нитки работоспособных петель и конденсируется в парогенераторах. Для поддержания постоянного уровня теплоносителя в активной зоне в напорную камеру осуществляется подача воды из емкости SA03 с постоянным расходом. Таким образом, на входах в горячие нитки работоспособных петель удается реализовать условия, аналогичные условиям в баке БЗ стенда GE2M-ПГ.

На рисунке 3 представлена нодализационная схема расчетной модели кода ТЕЧЬ-М. Парогенераторы расчетной модели разбиты на семь расчетных элементов. За основу взята расчетная модель НВ АЭС-2, уменьшенная в соответствии с масштабом экспериментальной установки с сохранением высотных отметок, размеры парогенератора расчетной модели соответствуют размерам модели парогенератора экспериментальной установки GE2M-ПГ.

Алгоритм расчетов построен следующим образом. Рассматривается режим с разрывом ГЦТ на горячей нитке около патрубка реактора. Начальное состояние – давление в первом контуре 1 МПа; температура теплоносителя на входе в активную зону 139,9°C, значение расхода в первом контуре 90 кг/с, мощность активной

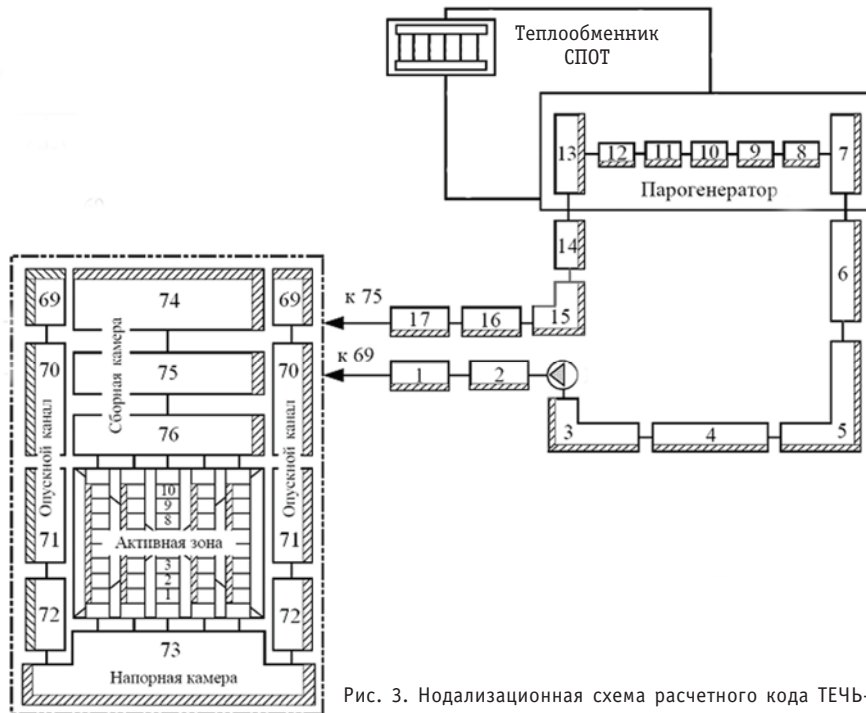


Рис. 3. Нодализационная схема расчетного кода ТЕЧЬ-М

зоны 0,7 МВт. Эти параметры весьма условны и приняты для того, чтобы сократить время перехода от стационарного состояния до интересующего нас периода.

Значение давления в 30 задается таблично таким образом, чтобы давление на входе в модель ПГ было близко к значению давления в эксперименте. Мощность СПОТ устанавливалась таблично равной экспериментальной.

В экспериментах с парогазовой смесью рассматривается процесс отравления трубного пучка парогенератора, когда в 76-й элемент сборной камеры реактора (СКР) подаются неконденсирующиеся газы азот и гелий с постоянным расходом. Значения расходов газов подбираются таким образом, чтобы обеспечить на входе в горячую нитку трубопровода (элемент 17) концентрацию неконденсирующихся газов, соответствующую экспериментальной.

Алгоритм расчета экспериментов с отводом парогазовой смеси отличается от алгоритма расчета экспериментов с отравлением ПГ тем, что через 1000 с расчетного процесса открывается сдвух ПГС из холодного коллектора ПГ (элемент 7). Расход сдвух соответствует экспериментальному.

При моделировании экспериментов, проведенных методом стационарных состояний, расчетный процесс условно разбивается на два этапа: первый продолжительностью 6000 с, когда модель находится в стационарном состоянии и в СКР не поступают неконденсирующиеся газы, и заключительный этап длительностью 6000 – 20000 с, когда осуществляется подача неконденсирующихся газов в СКР. На протяжении всего времени расчета из холодного коллектора модели ПГ осуществляется сдвух ПГС с расходом, соответствующим экспериментальному. В конце расчетного процесса модель достигает стационарного состояния.

РАСЧЕТНЫЙ КОД КОРСАР/ГП

КОРСАР/ГП предназначен для численного моделирования динамики реакторных установок с ВВЭР в режимах нормальной эксплуатации, в режимах с наруше-

ниями в работе оборудования первого и второго контуров, в проектных и запроектных авариях, а также для моделирования теплогидравлических экспериментальных установок и стендов с водяным теплоносителем.

Код КОРСАР/ГП базируется на двухжидкостной модели нестационарной контурной теплогидравлики и имеет модульную структуру функционального наполнения. Данная структура обеспечивает с помощью сервисных программных средств возможность формирования и решения задачи в идеологии гибкой топологической схемы, т.е. возможность расчета реакторных и других теплоэнергетических установок с произвольным составом и компоновкой оборудования в пределах области применения кода без его перетрансляции на персональный компьютер.

При проведении расчетов по расчетному коду КОРСАР/ГП использовалась нодализационная схема, представленная на рис. 4. Точками на схеме показаны места задания местных гидравлических сопротивлений.

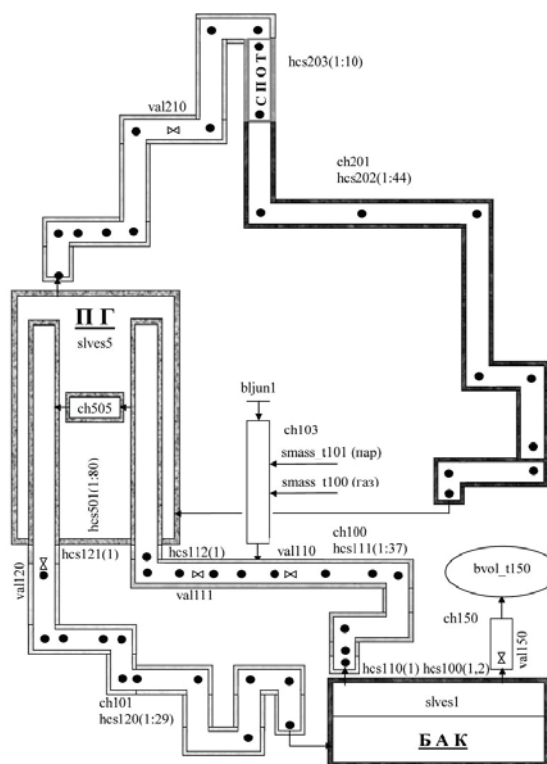


Рис. 4. Нодализационная схема расчетного кода КОРСАР/ГП

При проведении расчетов бак Б3 стенда ГЕ2М-ПГ представлен элементом *slves* (пароводяной сосуд под давлением). Также элементом *slves* моделировался и парогенератор стенда. Трубопроводы первого и второго контуров стенда моделировались элементом *ch*. Тепловая конструкция *hcs* позволяет делать расчеты полей температур в твердом теле и задавать энерговыделения в объеме тела. Дренажи из трубопроводов, сдвуха из холодного коллектора, а также задание расходов пара и газа задавались элементами *smass_t*, которые предназначены для задания расходов и энтальпий фаз среды, подаваемой в расчетную ячейку или забираемой из нее. Теплообмен на внешних поверхностях трубопроводов и оборудования стенда задавался граничным условием по теплообмену *BHEAT*. Тепло, отбираемое теплообменником СПОТ, задавалось элементом *qfl*.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Для проведения посттестовых расчетов и верификации расчетных кодов ТЕЧЬ-М и КОРСАР/ГП в части моделирования теплообмена в модели парогенератора при низких тепловых потоках в присутствии неконденсирующихся газов и без них использовались результаты экспериментов, проведенных на стенде ГЕ2М-ПГ. Основные параметры опытов приведены в табл. 1.

Таблица 1

Параметры экспериментов, использовавшихся для верификации кодов

| Номер опыта | Давление в первом контуре, МПа | Температура в первом контуре, °С | Концентрация неконденсирующихся газов | | Величина сдувки ПГС из ПГ, л/с |
|-------------|--------------------------------|----------------------------------|---------------------------------------|-------------|--------------------------------|
| | | | Азот, г/кг | Гелий, г/кг | |
| 126/1-4 | 0,368 | 140,6 | – | – | – |
| 145/1-3 | 0,361 | 139,9 | – | – | – |
| 135 | 0,371 | 140,9 | 2,095 | 0,047 | – |
| 137 | 0,374 | 141,2 | 2,087 | 0,043 | 0,208 |
| 201 | 0,361 | 140,0 | 0,462 | 0,032 | 0,208 |

Были использованы экспериментальные результаты, полученные на всех четырех этапах исследования: опыты без газа, эксперименты с подачей неконденсирующихся газов (со сдувкой и без сдувки парогазовой смеси из модели ПГ) и опыты, проведенные методом стационарных состояний.

На рисунке 5 приведено сравнение расчетных величин конденсационной мощности со значениями, полученными в экспериментах без неконденсирующихся газов, в зависимости от температурного напора. Осредняющие линии соответствуют расчетным зависимостям, полученным при вычислениях по кодам. По сути эти зависимости являются характеристикой конденсационной способности парогенератора. Расчетные данные показывают удовлетворительное совпадение с экспериментальными результатами, полученными на модели парогенератора стенда ГЕ2М-ПГ.

Для расчета теплоотдачи при кипении по коду ТЕЧЬ-М использовались две расчетные зависимости. При значениях плотности теплового потока q больше 10^5 Вт/м² использовалась формула [7]

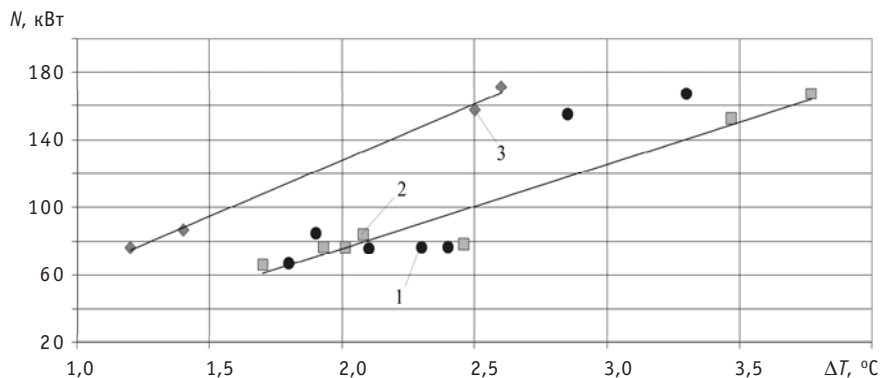


Рис. 5. Сравнение расчетной и экспериментальной величин конденсационной мощности модели парогенератора при подаче чистого пара: 1 – эксперимент; 2 – расчет по коду ТЕЧЬ-М; 3 – расчет по коду КОРСАР/ГП

$$\alpha = \sqrt{\alpha_{\text{конв}}^2 + \alpha_{\text{б0}}^2 + 7 \cdot 10^{-9} \cdot \left(\frac{\omega \cdot \rho' \cdot (i'' - i')}{q} \right)^{3/2}} \cdot \alpha_{\text{б0}}^2, \quad (1)$$

где $\alpha_{\text{конв}}$ – значение коэффициента теплоотдачи, определенное по формулам конвективного теплообмена; $\alpha_{\text{б0}}$ – значение коэффициента теплоотдачи при кипении в большом объеме по формуле [7]

$$\alpha_{\text{б0}} = 3 \cdot 1,163 \cdot \left(\frac{q}{1,163} \right)^{0,7} \cdot \left[\left(\frac{P}{98066,5} \right)^{0,14} + 0,000183 \cdot \left(\frac{P}{98066,5} \right)^2 \right], \quad (2)$$

где q – плотность теплового потока, Вт/м²; P – давление, Па.

Однако зависимость (2) некорректно описывает процессы, имеющие место при работе парогенератора в конденсационном режиме, характеризующемся значительно более низкими величинами тепловых потоков. Поэтому на основании анализа экспериментальных данных, полученных на стенде ГЕ2М-ПГ, была произведена корректировка программного модуля кода ТЕЧЬ-М. Суть корректировки состоит в реализации двух положений:

- при тепловых потоках менее 10 кВт/м² теплоотдача определяется механизмом свободной конвекции;
- в зависимости от состояния поверхности различия в значениях коэффициентов теплоотдачи могут достигать $\pm 35\%$, при этом устойчивая зависимость коэффициента теплоотдачи от теплового потока проявляется при потоках выше 150–200 кВт/м².

Для определения коэффициента теплоотдачи в условиях свободной конвекции в программном комплексе ТЕЧЬ-М при малых значениях комплекса $Gr \cdot Pr$ ($10^3 < Gr \cdot Pr < 10^6$) использовано соотношение из [8]

$$\alpha_{\text{конв}} = 0,105 \frac{\lambda}{d} (Gr \cdot Pr)^{1/3}. \quad (3)$$

Данная формула используется при значениях тепловых потоков ниже 10⁴ Вт/м². При тепловых потоках ниже 10⁵ Вт/м² значение коэффициента теплоотдачи определяется методом линейной интерполяции по значению удельного теплового потока между значениями, полученными при свободной конвекции, и значениями, полученными по формуле (1).

Из рисунка 5 видно, что скорректированная зависимость достаточно хорошо описывает экспериментальные данные.

Основным критерием для сравнительного анализа экспериментальных и расчетных результатов, полученных в опытах с подачей неконденсирующихся газов, являлось изменение конденсационной мощности модели парогенератора в зависимости от времени. Результаты сравнения расчетных и экспериментальных величин $N_{\text{кон}}$ в экспериментах №№ 135, 137 и 201 представлены на рис. 6–8.

Из рисунков видно удовлетворительное совпадение результатов расчетов по кодам ТЕЧЬ-М и КОРСАР/ГП с экспериментальными данными. По результатам верификации и посттестрасчетов можно сделать вывод о достоверном предсказании расчетными кодами работы модели парогенератора ВВЭР в конденсационном режиме.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Выполнено расчетно-экспериментальное исследование работы модели парогенератора ВВЭР в конденсационном режиме при запроектной аварии.

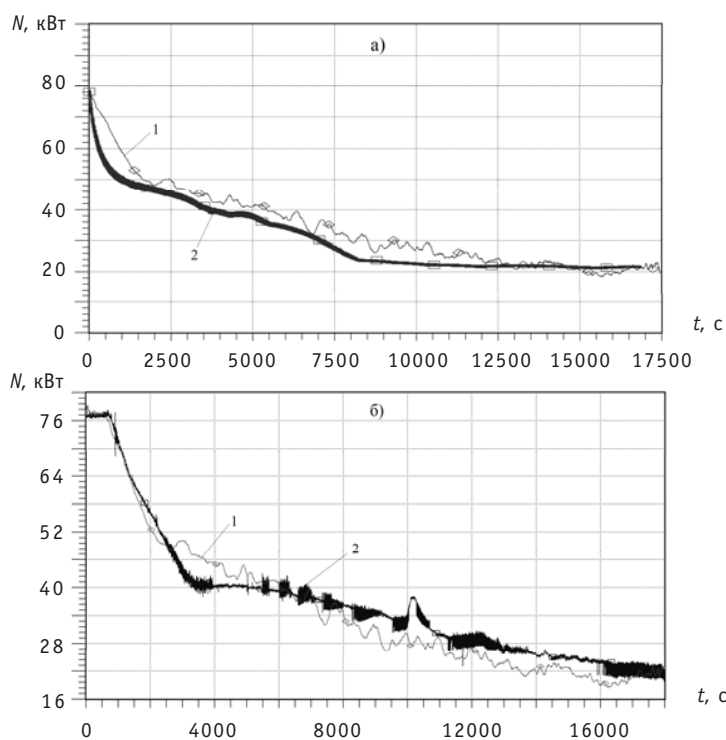


Рис. 6. Конденсационная мощность модели парогенератора в эксперименте №135: 1 – эксперимент; 2 – расчет; а) – расчет по коду ТЕЧЬ-М; б) – расчет по коду КОРСАР/ГП

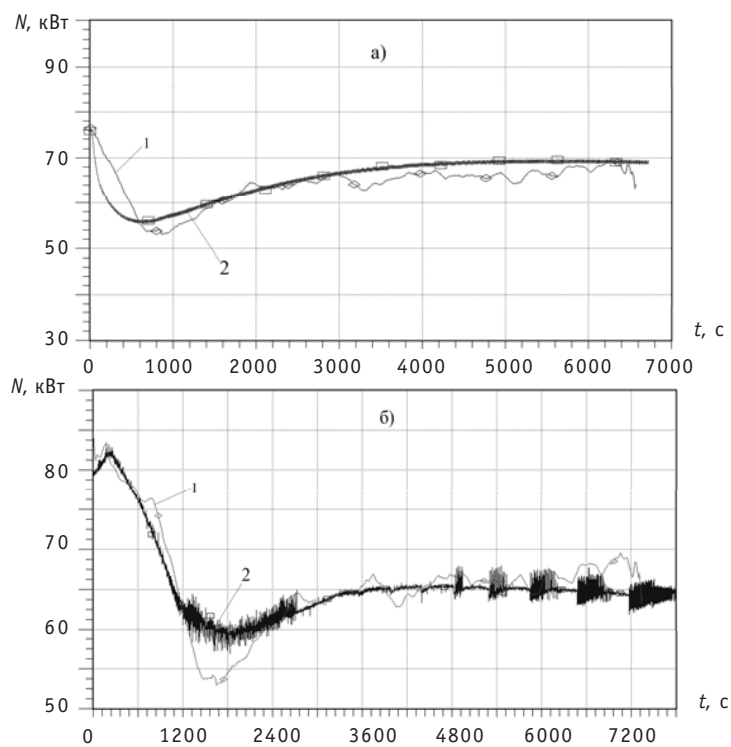


Рис. 7. Конденсационная мощность модели парогенератора в эксперименте № 137: 1 – эксперимент; 2 – расчет; а) – расчет по коду ТЕЧЬ-М; б) – расчет по коду КОРСАР/ГП

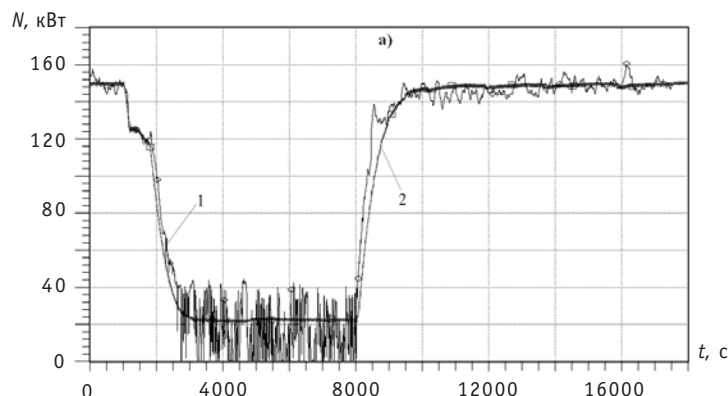


Рис. 8. Конденсационная мощность модели парогенератора в эксперименте №201, расчет по коду КОРСАР/ГП: 1 – эксперимент; 2 – расчет

2. На стенде ГЕ2М-ПГ проведены эксперименты, которые позволили определить основные характеристики работы парогенератора ВВЭР в режиме конденсации на чистом паре и с наличием неконденсирующихся газов.

3. Посттестовые расчеты с помощью кодов КОРСАР/ГП и ТЕЧЬ-М показали, что математические модели, заложенные в коды, позволяют моделировать процессы тепло- и массообмена при конденсации пара и парогазовой смеси в трубчатке модели парогенератора реактора ВВЭР.

Литература

1. Калякин С.Г., Ремизов О.В., Таранов Г.С. и др. Экспериментальное исследование влияния неконденсирующихся газов на работу парогенератора ВВЭР в конденсационном режиме/Международный конгресс по достижениям в области АЭС ICAPP 08 (8-12 июня 2008 г.): Сб. трудов. – Анахайм, Калифорния, США, 2008. (CD-ROM).
2. Зайцев А.А., Калякин Д.С., Лукьянов А.А. и др. Расчетно-экспериментальное исследование влияния неконденсирующихся газов на работу модели парогенератора ВВЭР в конденсационном режиме при запроектной аварии//Известия вузов. Ядерная энергетика – 2010. – № 4. – С. 172-182.
3. Беркович В.М., Копытов И.И., Таранов Г.С. и др. Особенности проекта АЭС нового поколения с реактором ВВЭР-1000 повышенной безопасности//Теплоэнергетика. – 2005. – № 1. – С. 9-15.
4. Коршунов А.С., Таранов Г.С. Использование пассивных технологий обеспечения безопасности в проекте НВАЭС-2. Пути совершенствования пассивных технологий для исключения тяжелых аварий/Сборник докладов VI Международной научно-технической конференции «Безопасность, эффективность и экономика атомной энергетики». – Москва, 2008.
5. Калякин С.Г., Ремизов О.В., А.В. Морозов и др. Обоснование проектных функций системы пассивного залива ГЕ-2 усовершенствованного проекта АЭС с реактором ВВЭР//Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2003. – № 2. – С. 94-101.
6. Борисов С.Л., Борисов Л.Н., Филь Н.С. и др. Валидация программы ТЕЧЬ-М-97 по результатам эксперимента с большой течью на крупномасштабном стенде с ядерным нагревом/IV Международная научно-техническая конференция «Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР» (Подольск, 23-25 мая 2005 г.): Сб. докладов. – Подольск: ОКБ «Гидропресс», 2005. (CD-ROM).
7. Андреевский З.Л., Боришанский В.М. и др./Труды ЦКТИ. – 1971. – Вып. 108.
8. Михеев М.А., Михеева И.М. Основы теплопередачи. – М.: Энергия, 1973. – С. 106.

Поступила в редакцию 14.03.2012

were compared with the experimental ones. The best approach for simulation of the two-phase flow drag with the tube bundle based on the empirical two-phase flow hydraulic resistance correlations was identified.

УДК 621.039.51

Experimental Determination of Power-Release in the Lead and Uranium Samples Irradiated by High-Energy Protons \A.A. Goverdovskiy, B.V. Keadze, D.M. Kovalev, R.R. Chernov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2012. – 8 pages, 3 tables, 9 illustrations. – References, 2 titles.

The paper describes the development, laboratory tests, and accelerator experiments of a measurement procedure of power-release in lead and uranium samples. The measurement procedure involved provides a reliable measurement of temperature of the sample at its rate of the change of 0,1 K per minute. The power-release data received in the lead and uranium sample are very important for tackling the problems of optimization of heat-removal from the irradiated target sample. The results obtained contributes to the development of ADS.

УДК 621.039.5

Hydrodynamics and Heat Transfer in Reactor Installation «MASTER» \S.L. Dorohovich, Yu.A. Kazanskiy, A.A. Kazantsev, S.V. Kovalchuk, A.V. Levchenko, V.A. Levchenko, Yu.S. Yurev; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2012. – 13 pages, 2 tables, 10 illustrations. – References, 6 titles.

The paper is concerned with results of calculation investigations of heat and hydrodynamic processes in reactor installation «MASTER». Designing and testing calculations using CFD-code «KANAL» were performed.

УДК 621.039.58: 536.423

Verification of TECH-M and KORSAR/GP Computer Codes on the Basis of Experimental Results Obtained on Large-scale Test Facility GE2M-PG \A.V. Morozov, O.V. Remizov, D.S. Kalyakin, V.I. Asyunin, V.I. Schekoldin, S.I. Zaitsev, M.O. Zakutaev; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2012. – 11 pages, 1 table, 8 illustrations. – References, 8 titles.

The paper presents the results of calculations of the experiments conducted at the GE2M-PG test facility in SSC RF-IPPE. These experiments simulate the operation of steam generator during the cooling of the core of the “NPP-2006” VVER reactor by the joint action of passive safety systems HA-2 and PHRS in case of accidents with loss of primary coolant. The purpose of the work was to conduct a post test calculations and verification of computer codes TECH-M and KORSAR/GP in terms of modeling of heat transfer processes in a steam generator model at low heat fluxes in the presence of noncondensable gases, and without them. As a result of verification it is possible to conclude about the ability of computer codes to reproduce the phenomenon of non-condensable gases distribution, accumulation and their effects on heat transfer in a steam generator tube bundle.

УДК 621.039.534

Calculation of Heat Transfer at the Seven Heated Rod Assembly upon Supercritical Fluid Parameters \I.A. Chusov, A.S. Shelegov, V.I. Slobodchuk, V.F. Ukraintsev; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2012. – 8 pages, 9 illustrations. – References, 6 titles.

The results of calculation analysis of experiments on thermal hydraulic of the seven fuel pin assembly under supercritical coolant parameters are presented. Calculations were done in accordance with experimental condition and results of SSC RF IPPE on modeling coolant freon-12. Comparison between experimental and calculation results was carried out. Possible ways of improvement of calculation technique were discussed.