

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОМАССОБМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ РАБОТЕ ПАРОГЕНЕРАТОРА ВВЭР В АВАРИЙНОМ КОНДЕНСАЦИОННОМ РЕЖИМЕ

А.С. Шлёпкин, А.В. Морозов, Д.С. Калякин, А.С. Сошкина

АО «ГНЦ РФ-ФЭИ им. А.И. Лейпунского»

249033, г. Обнинск, Калужской обл., пл. Бондаренко, 1



Для оценки работоспособности парогенератора ВВЭР и исследования влияния начальных условий аварии на процессы теплообмена в трубном пучке парогенератора в АО «ГНЦ РФ-ФЭИ» был сооружен стенд «ГЕ2М-ПГ». На нем были проведены опыты с наличием и отсутствием отвода парогазовой смеси из холодного коллектора парогенератора (ПГ). На первом этапе экспериментов изучалась работоспособность модели парогенератора в конденсационном режиме при различных концентрациях неконденсирующихся газов в паре на входе в модель ПГ и расходе отвода парогазовой смеси из холодного коллектора. На втором этапе экспериментов, без отвода парогазовой смеси, исследовалось влияние основных режимных факторов на эффективность теплообменных процессов в трубном пучке парогенератора.

Полученные результаты можно использовать для верификации расчетных кодов, используемых для расчетного моделирования аварийных процессов в реакторной установке ВВЭР.

Ключевые слова: ВВЭР, парогенератор, пассивные системы безопасности, система пассивного отвода тепла, неконденсирующиеся газы, парогазовая смесь.

ВВЕДЕНИЕ

Главной инновацией в области обеспечения безопасности новых проектов реакторов ВВЭР является совместное использование активных и новых пассивных систем безопасности [1]. В число таких систем входят система пассивного залива активной зоны из гидроемкостей второй ступени (ГЕ-2) и система пассивного отвода тепла (СПОТ) [2].

Задача СПОТ состоит в длительном отводе остаточных тепловыделений от активной зоны реактора путем перевода горизонтальных парогенераторов (ПГ) в работу в режиме конденсации пара первого контура, поступающего в трубчатку ПГ из реактора, чем обеспечивается подпитка активной зоны [3, 4].

В СПОТ используются воздушные теплообменники [5], позволяющие отводить практически неограниченное количество энергии, однако время работы системы не является бесконечным и ограничивается снижением конденсационной мощности парогенератора, вызванным накоплением в трубном пучке ПГ неконденсирующихся газов, посту-

© А.С. Шлёпкин, А.В. Морозов, Д.С. Калякин, А.С. Сошкина, 2017

пающих из реактора и сосудов гидроемкостей первой ступени [6].

Конденсационная мощность парогенератора поддерживается благодаря наличию ряда факторов. Во-первых, в ходе протекания аварийного процесса происходит отвод парогазовой смеси (ПГС) из холодного коллектора парогенератора в объем сосудов ГЕ-2 по мере их опустошения [7]. Во-вторых, в самом парогенераторе протекают процессы, способствующие поддержанию работы ПГ в конденсационном режиме за счет наличия связи между температурным напором между контурами, накоплением неконденсирующихся газов в трубном пучке и расходом пара в ПГ [8].

Процесс конденсации пара в многорядных теплообменниках в присутствии неконденсирующихся газов достаточно подробно исследован применительно к различным ПСБ [9 – 14]. Однако СПОТ РУ ВВЭР имеет существенные отличия от однотипных систем. Кроме того, рассчитать аналитическим путем влияние газов на теплообмен между I и II контурами в случае двойного фазового перехода и конденсации пара в горизонтальном многорядном трубном пучке достаточно сложно [15]. Поэтому в АО «ГНЦ РФ-ФЭИ» для обоснования работоспособности ПГ в конденсационном режиме был сооружен стенд ГЕ2М-ПГ [16].

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА «ГЕ2М-ПГ»

Стенд ГЕ2М-ПГ является крупномасштабной экспериментальной установкой, предназначенной для исследования работоспособности пассивных систем безопасности, входящих в проекты реакторов ВВЭР нового поколения [17]. На рисунке 1 показана принципиальная технологическая схема стенда.

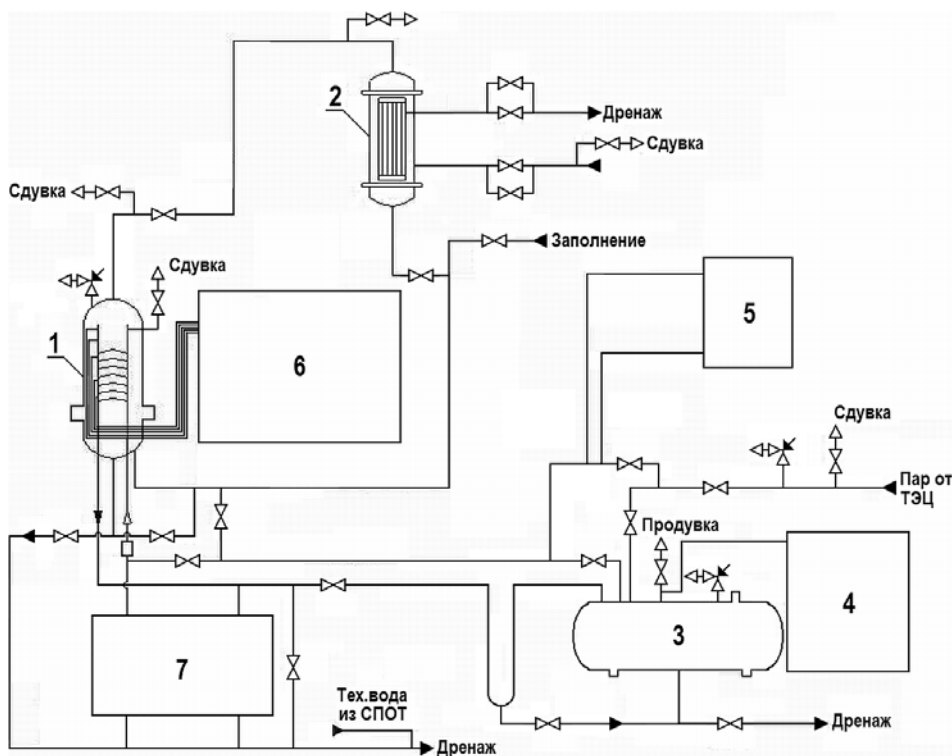


Рис. 1. Принципиальная технологическая схема стенда ГЕ2М-ПГ: 1 – модель парогенератора; 2 – модель теплообменника СПОТ; 3 – бак-аккумулятор пара; 4 – система поддержания давления контура; 5 – система подачи неконденсирующихся газов; 6 – система отвода парогазовой смеси; 7 – система сбора конденсата

В состав стенда входят модель парогенератора реактора ВВЭР, бак-аккумулятор пара с системой подачи пара от ТЭЦ, модель теплообменника СПОТ. Основное оборудование

стенда связано между собой трубопроводами и оснащено запорно-отсечной арматурой. Высотные отметки размещения оборудования соответствуют проектным [18].

Контрольно-измерительные приборы, установленные на стенде, позволяли при проведении опытов регистрировать такие параметры установки, как давление, температура, расход пара и технической воды.

С помощью датчика дифференциального давления Метран-100 ДД измерялся перепад давления между контурами стенда, а с помощью дифференциальной термопары – температурный напор между средами первого (на входе в трубчатку) и второго (на выходе из объема межтрубного пространства) контуров. Модель парогенератора была оснащена более чем 100 кабельными термопарами с диаметром 1,0 мм, позволяющими контролировать параметры сред первого и второго контуров стенда. Регистрация давления по контурам стенда выполнялась с помощью пьезорезисторных датчиков избыточного давления Метран-100-ДИ (класс точности 0,1). Частота опроса измерительных каналов системы сбора составляла один опрос в секунду.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Задача исследования состояла в изучении процессов конденсации пара в модели ПГ в присутствии неконденсирующегося газа. Эксперименты по исследованию работы модели ПГ в конденсационном режиме были выполнены при рабочем давлении первого контура 0,3 – 0,37 МПа, которое соответствует давлению в реакторной установке для сценария запроектной аварии с разрывом главного циркуляционного трубопровода. Значение конденсационной мощности выбиралось исходя из расчетной характеристики теплообменника СПОТ при заданном давлении [19].

Эксперименты на крупномасштабном стенде ГЕ2М-ПГ выполнялись по следующей методике. В начале эксперимента проводился последовательный прогрев паром бака-аккумулятора, модели ПГ, модели теплообменника СПОТ, а также трубопроводов, образующих первый и второй контуры стенда. Прогрев стенда происходил до установления в контурах стенда стационарных параметров среды: давление первого контура равно давлению подаваемого на стенд пара, его значение должно быть больше чем давление второго контура, температура первого контура равна температуре насыщения пара. Равномерное тепловое поле по высоте объема котловой воды ПГ и стабильность давлений в первом и втором контурах стенда служили определяющими показателями прогрева стенда [20]. Одновременно, с целью недопущения наличия в контурах паровоздушной смеси открытием соответствующих продувочных вентилей обеспечивался отвод воздуха из трубопроводов и основного оборудования стенда. Далее с помощью арматуры на контуре технической воды устанавливались необходимые значения конденсационной мощности ПГ и давления среды в контурах стенда. После перехода стенда в стационарный режим начиналась запись параметров с помощью системы сбора.

В соответствии со сценарием эксперимента на вход модели ПГ начиналась подача неконденсирующегося газа. Если методикой эксперимента был предусмотрен отвод парогазовой смеси из трубчатки ПГ, то одновременно обеспечивался соответствующий расход из холодного коллектора ПГ.

Концентрация неконденсирующегося газа в паре, поступавшего в модель ПГ, определялась исходя из расчетных данных по газогенерации в первом контуре реальной АЭС для двух сценариев запроектной аварии. Для одного из экспериментов был принят наиболее консервативный вариант, т.е. учитывалось влияние растворенного в воде сосудов системы ГЕ-1 азота. Во втором случае постулировалось истечение теплоносителя, поступившего из баков гидроемкостей первой ступени вместе с растворенными в нем газами, в защитную оболочку через сечение разрыва. В экспериментах использовались азот и гелий, заменяющий водород при сохранении мольной концентрации газов.

Расход отводимой парогазовой смеси соответствовал расходной характеристике парогазовой смеси из холодного коллектора ПГ в объем баков ГЕ-2 с учетом масштаба стенда. Расход ПГС в объем гидроемкостей второй ступени определялся ступенчатой расходной характеристикой системы ГЕ-2 [21].

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

В ходе исследований на установке был проведен ряд экспериментов в два этапа: с наличием и отсутствием отвода ПГС из холодного коллектора парогенератора.

Задачей первой серии экспериментов являлось изучение работоспособности парогенератора в конденсационном режиме при подаче различного количества неконденсирующихся газов и наличия сдувки из холодного коллектора ПГ. Главным параметром, определяющим работоспособность парогенератора, являлась его конденсационная мощность. Основные исходные параметры первого этапа опытов приведены в табл. 1.

Таблица 1

Основные параметры первого этапа опытов

Номер опыта	C_{N_2} , г/кг пара	C_{He} , г/кг пара	C_3 , г/кг пара	Расход отвода ПГС, л/с
1	2,1	0,04	2,4	0,217
2	0,12	0,053	0,54	0,217
3	0,12	0,041	0,45	0,217
4	0,11	0,042	0,44	0,217
5	0,41	0	0,41	0,217
6	2,1	0,043	2,4	0,163

Для учета различия в составе газов, поступающих на вход модели ПГ, в опытах была введена эквивалентная концентрация C_3 , позволяющая оценить совокупное влияние азота и гелия на процессы в парогенераторе.

На рисунке 2 представлено изменение конденсационной мощности модели парогенератора в опыте №1 с наибольшей эквивалентной концентрацией неконденсирующихся газов.

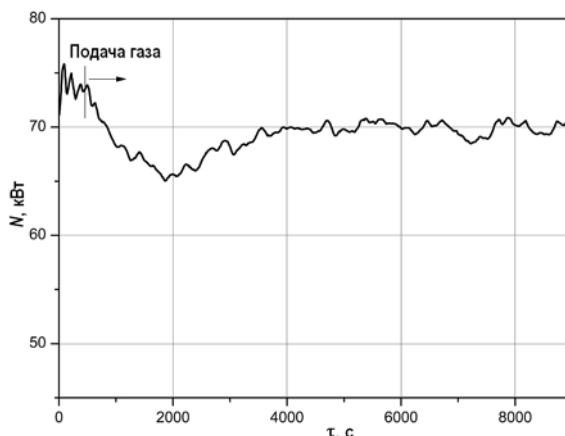


Рис. 2. Эксперимент №1. Изменение конденсационной мощности модели парогенератора

Как видно из рисунка, в ходе эксперимента после подачи газа отмечалось снижение мощности модели парогенератора, вызванное ухудшением условий конденсации пара. После достижения минимума мощность начинает возрастать и после завершения переходного периода стабилизируется на значении 93% от начальной. Это связано с нали-

чением температурного напора при работе СПОТ – в результате уменьшения количества сконденсированного пара происходит падение температуры среды второго контура, что влечет за собой увеличение температурного напора между контурами, которое, в свою очередь, приводит к росту конденсационной мощности парогенератора.

Из-за различий в начальных значениях мощностей модели ПГ в экспериментах для сравнения результатов была использована относительная конденсационная мощность N/N_0 , которая представляет собой отношение текущей конденсационной мощности к начальной. На рисунке 3 изображена зависимость относительной конденсационной мощности от концентраций газов в экспериментах № 1 – 5. На рисунке 3а изображено отношение конденсационной мощности после подачи газа к ее начальному значению в каждом из опытов. На рисунке 3б показаны концентрации азота, гелия в смеси, поступающей на вход в модели ПГ, а также их эквивалентные концентрации в каждом эксперименте.

Как видно из рисунка, отличия между значениями относительной конденсационной мощности в различных опытах, имеющих близкие эквивалентные концентрации неконденсирующихся газов на входе в модель ПГ, не превышают значения погрешности приборов измерения. Однако, как видно из сравнения экспериментов № 1 и № 2 – 5, при увеличении эквивалентной концентрации газов с $\sim 0,47$ до $\sim 2,5$ г/кг N/N_0 уменьшалось с $\sim 0,93$ до $\sim 0,83$. Эксперименты № 4 и № 5 были проведены при различных соотношениях неконденсирующихся газов в смеси, поступающей на вход модели парогенератора. В опыте №5 полностью отсутствовал гелий, а значение концентрации азота было заметно больше чем в опыте № 4. Таким образом, из анализа полученных результатов можно сделать вывод о том, что конденсационная мощность парогенератора, в первую очередь, зависит от суммарной концентрации поступающих в модель ПГ неконденсируемых газов, в то время как их соотношение в парогазовой смеси не оказывает заметного влияния на конденсационную мощность ПГ в исследованном диапазоне параметров.

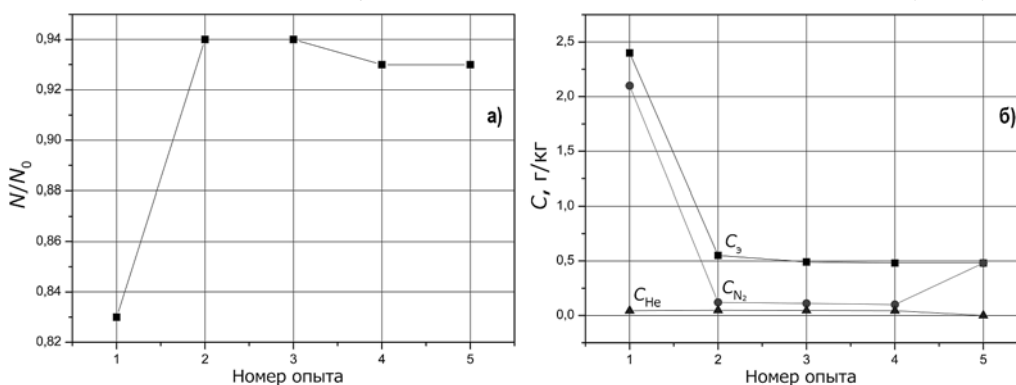


Рис. 3. Изменение относительной конденсационной мощности модели ПГ при изменении концентрации и состава неконденсирующихся газов: а) – значение относительной конденсационной мощности парогенератора в опытах; б) – значения концентраций азота, гелия и их эквивалентной концентрации на входе в модель ПГ

Для исследования влияния величины отвода ПГС на работоспособность ПГ на стенде был проведен дополнительный опыт №6, в котором концентрация неконденсирующихся газов была равна значению в опыте №1, а расход сдувки был уменьшен на 25%. На рисунке 4 представлена зависимость конденсационной мощности от расхода отвода ПГС из холодного коллектора ПГ.

Как видно из рисунка, при уменьшении отвода ПГС с 0,217 до 0,163 л/с, итоговая мощность модели ПГ (в стационарном режиме) снижалась с ~ 83 до $\sim 56\%$ от начальной на чистом паре. Таким образом, отвод парогазовой смеси из холодного коллектора парогенератора имеет важное значение для поддержания его конденсационной мощности.

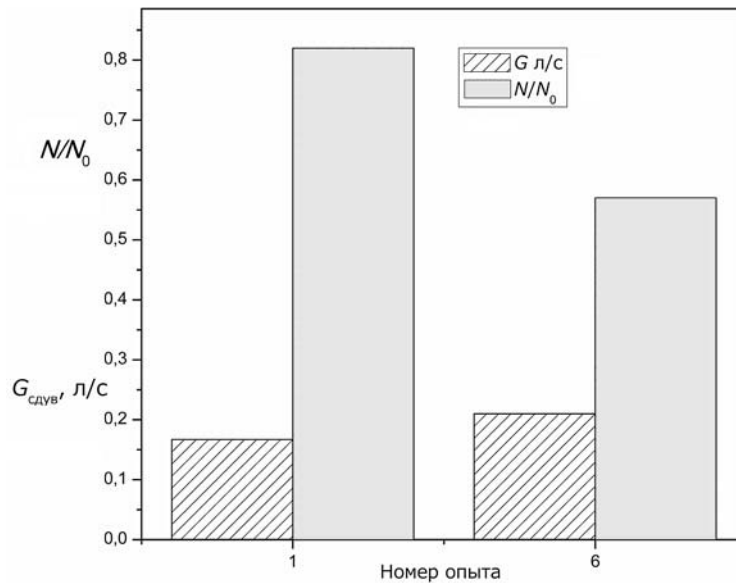


Рис. 4. Изменение относительной конденсационной мощности парогенератора при уменьшении отвода ПГС

Для более детального исследования процессов конденсации пара в присутствии неконденсирующихся газов и для получения результатов для верификации расчетных кодов была проведен второй этап экспериментов без отвода парогазовой смеси. Диапазон концентраций неконденсирующихся газов, поступающих в парогенератор, был расширен за счет добавления значений концентраций, характерных для окончания первых суток аварийного процесса, а также соответствующих возникновению возможной локальной пароциркониевой реакции в активной зоне. Основные исходные параметры второго этапа опытов приведены в табл. 2.

Таблица 2

Основные параметры второго этапа опытов

Номер опыта	C_{N_2} , г/кг пара	C_{He} , г/кг пара	C_z , г/кг пара
7	2,1	0,05	2,4
8	0	0,3	2,1
9	0,02	0,0032	0,046
10	0	1,0	7,0

На рисунке 5 представлено изменение во времени конденсационной мощности модели парогенератора в одном из опытов.

Как видно из рисунка, в случае отсутствия сдувки газов мощность ПГ непрерывно снижалась и к 6000 секунде достигла значения ~32% от начальной. В то же время в эксперименте №1 с отводом ПГС, имеющем схожие значения концентрации неконденсирующихся газов в паре, за 14000 с мощность парогенератора не упала ниже ~93% от начальной, что еще раз подтверждает важное значение отвода ПГС для поддержания конденсационной мощности ПГ. Резкое падение конденсационной мощности, наблюдавшееся на первом этапе опыта, было связано с замещением в объеме трубочки ПГ чистого пара на парогазовую смесь, а также с кратковременной блокировкой неконденсирующимися газами сечения подводящего паропровода.

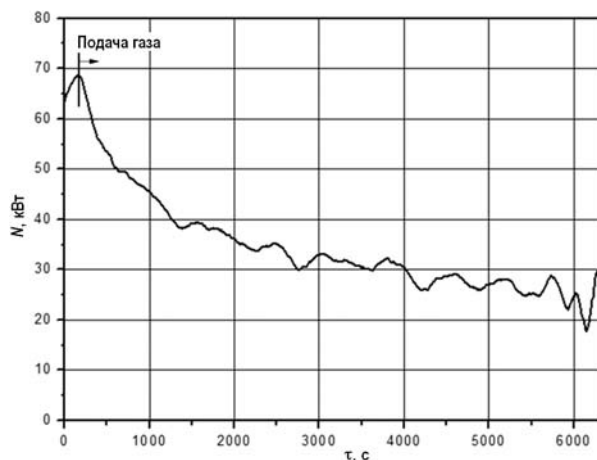


Рис. 5. Эксперимент №7. Изменение конденсационной мощности модели парогенератора

Рассчитать аналитическим путем влияние газов на теплообмен между I и II контурами в случае двойного фазового перехода и конденсации пара в горизонтальном многорядном трубном пучке довольно сложно. Поэтому для изучения процессов теплопередачи было проанализировано изменение в экспериментах ΔT – температурного перепада между средами первого и второго контуров. Данный показатель был выбран для анализа исходя из следующих соображений. В результате накопления неконденсирующихся газов уменьшается коэффициент теплоотдачи, вызывая снижение расхода пара в трубчатку парогенератора, что приводит к уменьшению значения теплового потока от первого контура ко второму. По этой же причине температура второго контура снижается (за счет работы СПОТ), тем самым увеличивается температурный перепад между средами первого и второго контуров реакторной установки. Это приводит к увеличению расхода пара, поступающего в парогенератор из реактора, из чего можно сделать вывод, что уменьшение коэффициента теплоотдачи вследствие накопления неконденсирующихся газов частично компенсируется за счет увеличения ΔT между контурами. Таким образом, чем выше разница этих температур, тем большее влияние газовая смесь оказывает на процессы теплообмена в трубном пучке ПГ.

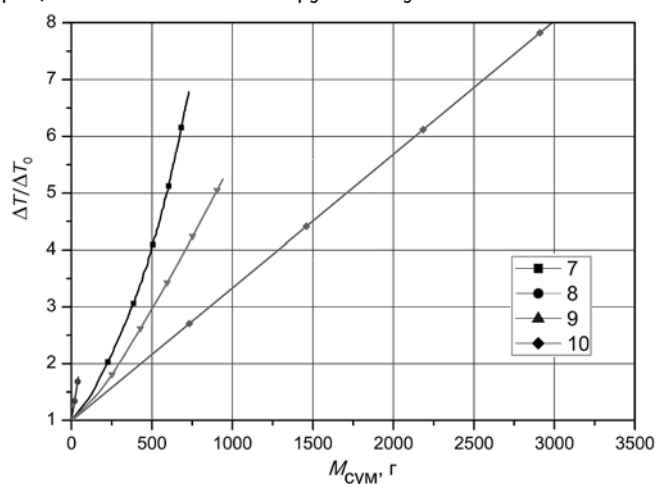


Рис. 6. Зависимость $\Delta T/\Delta T_0$ от накопленной в трубном пучке массы неконденсирующихся газов в различных экспериментах. 7 – 10 – номера экспериментов

На рисунке 6 изображена зависимость относительного температурного перепада $\Delta T/\Delta T_0$ (ΔT_0 – перепад температур между контурами в нулевой момент времени

до начала подачи неконденсирующихся газов), введенного для учета различий начальной мощности парогенератора, от суммарной массы накопленных в трубном пучке неконденсирующихся газов в различных экспериментах.

Как видно из рисунка, при одинаковой массе газов, накопленной в трубчатке парогенератора, величина $\Delta T/\Delta T_0$ имела различные значения, причем наименьший относительный перепад температур достигался в опыте № 10 с наибольшей концентрацией газов в ПГС на входе в ПГ. Это объясняется тем, что на теплообменные процессы, происходящие в парогенераторе, оказывает влияние не только масса накопленных в трубном пучке неконденсирующихся газов, но и скорость их накопления. Причина этого заключается в том, что при подаче неконденсирующихся газов наряду со снижением коэффициента теплообмена за счет «отравления» происходил рост перепада температур между контурами. Увеличение ΔT , с одной стороны, частично компенсирует эффект «отравления» ПГ, но одновременно с этим приводит к уменьшению мощности СПОТ (за счет снижения параметров второго контура). Это вызывает повышение температуры в межтрубном пространстве ПГ и снижение температурного перепада между контурами. При этом, чем выше была скорость накопления неконденсирующихся газов, тем сильнее снижалась мощность СПОТ и сильнее уменьшался температурный перепад. Данная связь имеет однозначно отрицательный эффект с точки зрения поддержания мощности парогенератора в аварийном режиме.

Из сказанного следует, что значение температурного перепада между средами первого и второго контуров зависит как от совокупной массы накопленных в трубном пучке неконденсирующихся газов, так и от скорости их накопления, определяемой мощностью парогенератора и концентрацией газов на входе в ПГ. Таким образом, для использования ΔT в качестве показателя эффективности процессов теплообмена в парогенераторе необходимо установить связь между перепадом температур между контурами, мощностью парогенератора и концентрацией неконденсирующихся газов.

Анализ экспериментальных данных показал, что относительный температурный перепад во всех экспериментах изменяется линейно, что позволяет представить зависимость для $\Delta T/\Delta T_0$ в виде

$$\Delta T/\Delta T_0 = 1 + a \cdot t, \quad (1)$$

где a – коэффициент, учитывающий влияние неконденсирующихся газов на процесс конденсации пара; t – время работы ПГ от начала поступления газов в трубчатку.

Обработка полученных экспериментальных данных позволила представить коэффициент a в виде степенной зависимости

$$a = 0,029 \cdot (M/t)^{0,72}, \quad (2)$$

где M – масса неконденсирующихся газов, накопленных в трубном пучке ПГ.

Масса газов может быть определена через расход пара на вход ПГ G и концентрацию неконденсирующихся газов в паре:

$$M = G \cdot C_3 \cdot t, \quad (3)$$

где C_3 – эквивалентная концентрация неконденсирующихся газов. Расход пара в ПГ можно представить в виде

$$G = N / r, \quad (4)$$

где N – конденсационная мощность ПГ; r – теплота парообразования.

Таким образом, подставив (4) в (3), получим выражение для M :

$$M = N \cdot C_3 \cdot t / r. \quad (5)$$

Рассматривая зависимости (2) – (5), выражение для относительного температурного перепада можно записать следующим образом:

$$\Delta T/\Delta T_0 = 1 + 0,029(N \cdot C_3 / r)^{0,72} \cdot t. \quad (6)$$

На рисунке 7 представлено сравнение экспериментальных данных с расчетными величинами $\Delta T/\Delta T_0$, полученными по формуле (6), для одного из экспериментов. Как видно из рисунка, отклонение расчетных значений от экспериментальных данных не превышает 12%, что говорит об удовлетворительном соответствии расчетной формулы и экспериментальных данных.

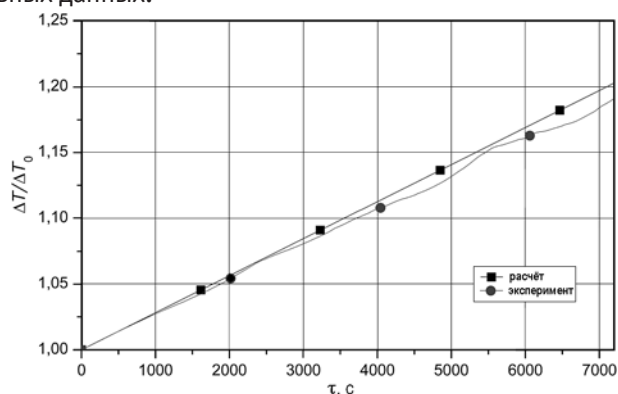


Рис. 7. Сравнение изменения относительных перепадов температур между контурами, полученных экспериментальным и расчетным путями в эксперименте №8

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На стенде ГЕ2М-ПГ были проведены эксперименты, направленные на изучение работоспособности парогенератора ВВЭР в аварийном конденсационном режиме, с отводом и без отвода парогазовой смеси из холодного коллектора.

В опытах с отводом ПГС было установлено, что конденсационная мощность парогенератора в значительной степени зависит от объемной концентрации газов в потоке пара, в то время как их соотношение в парогазовой смеси не оказывает заметного влияния на конденсационную мощность ПГ в исследованном диапазоне параметров.

Эксперименты без отвода парогазовой смеси позволили оценить степень влияния различных неконденсирующихся газов на теплообменный процесс. Установлено, что кроме непосредственного уменьшения коэффициента теплоотдачи, неконденсирующиеся газы оказывают негативное влияние на мощность СПОТ. Получена расчетная зависимость между перепадом температур между контурами, мощностью парогенератора и концентрацией неконденсирующихся газов.

Полученные результаты могут быть использованы для расчетного моделирования аварийных процессов в реакторной установке ВВЭР при работе пассивных систем безопасности.

Литература

1. Копытов И.И. Проект «АЭС-2006» – основа федеральной целевой программы «Развитие атомного энергопромышленного комплекса России на 2007-2010 годы и на перспективу до 2015 года». / Сборник тезисов II Международной научно-технической конференции «Безопасность, эффективность и экономика атомной энергетики». – М.: ВНИИАЭС, 2008. – С. 60-65.
2. Калякин С.Г., Сорокин А.П., Пивоваров В.А., Пометько Р.С., Селиванов Ю.Ф., Морозов А.В., Ремизов О.В. Экспериментальные исследования теплофизических процессов в обоснование безопасности ВВЭР нового поколения // Атомная энергия. – 2014. – Т. 116. – Вып.4. – С. 241-246.
3. Ремизов О.В., Морозов А.В., Цыганок А.А. Теплопередача между конденсирующимся паром и кипящей водой в многорядном горизонтальном трубном пучке при естественной конвекции // Известия Академии наук. Энергетика. – 2010. – № 2. – С. 152-158.

4. Ильченко А.Г., Зуев А.Н., Харитонин И.Е. Исследование работы энергоблока ВВЭР-1000 в режиме естественной циркуляции теплоносителя // Вестник ИГЭУ. – 2016. – № 2. – С. 1-5.
5. Морозов А.В., Ремизов О.В. Современные разработки систем пассивного отвода тепла водоохлаждаемых реакторов. // ВАНТ. Сер. Физика ядерных реакторов. – 2013. – Вып. 2. – С. 59-71.
6. Morozov A.V., Remizov O.V., Tsyganok A.A. Non-condensable gases effect on heat transfer processes between condensing steam and boiling water in heat exchanger with multirow horizontal tube bundle // Proceedings of 14-th International Heat Transfer Conference, IHTC14, 2010. – PP. 629-635.
7. Морозов А.В., Ремизов О.В. Экспериментальное обоснование проектных функций дополнительной системы пассивного залива активной зоны реактора ВВЭР // Теплоэнергетика. – 2012. – №5. – С. 22-27.
8. Морозов А.В., Шлепкин А.С. Анализ влияния режимных факторов на работу модели парогенератора ВВЭР в режиме конденсации пара // ВАНТ. Серия: Ядерно-реакторные константы. – 2016. – Вып. 3. – С. 91-99.
9. Welter K.B., Bajorek S.M., Woods B., Groome J., Reyes J.N. Confirmatory testing investigating advanced passive plant thermal-hydraulics // Proceedings of 13-th International Conference on Nuclear Engineering, 2005. – PP. 256-264.
10. Gautier Al. Passive heat removal system with the «Base Operation Passive Heat Removal» strategy. Application with Primary Heat Exchangers // Proceedings of ICONE 7, 1999. – PP. 174-187.
11. Brettschuh Werner, Meseth Johann. Experimental verification of SWR 1000 passive components and systems. Proceedings of ICAPP 2007, 2007. – PP. 74-76.
12. Schmidt H. Large Scale Verification of External RPV Cooling in Case of Severe Accident// Proceedings of ICAPP'04, 2004. – PP. 564-576.
13. Huggenberger M., Aubert C., Dreier J., Fischer O., Strassberger H.J. New passive decay heat removal tests in PANDA. Proceedings of 6-th International Conference on Nuclear Engineering ICONE-6264, 1998. – PP. 301-310.
14. Безлепкин В.В., Семашко С.Е., Сидоров В.Г. Иванов И.М., Затевахин М.А., Алексеев С.Б. Расчетно-экспериментальное обоснование пассивных систем в проекте ЛАЭС-2. / Сборник докладов II Международной научно-технической конференции «Безопасность, эффективность и экономика атомной энергетики», Москва, ВНИИАЭС, 2008. – С. 937-942.
15. Glaeser H. Uncertainty evaluation of thermal-hydraulic code results / Proceedings of international meeting on «Best-Estimate» Methods in Nuclear Installation Safety Analysis (BE-2000). Washington, DC, 2000.
16. Морозов А.В., Шлепкин А.С. Исследование работы модели парогенератора ВВЭР в конденсационном режиме при различных параметрах аварийного процесса / Труды IV Международной научно-технической конференции «Инновационные проекты и технологии ядерной энергетики» (МНТК НИКИЭТ-2016). Москва, АО «НИКИЭТ», 2016. – С. 245-261.
17. Морозов А.В., Ремизов О.В. Экспериментальное исследование работы модели парогенератора ВВЭР в конденсационном режиме // Теплоэнергетика. – 2012. – №5. – С. 16-21.
18. Berkovich V.M., Peresadko V.G., Taranov G.S., Remizov O.V., Morozov A.V., Tsyganok A.A., Kalyakin D.S. Experimental study on Novovoronezh NPP-2 steam generator model condensation power in the event of the beyond design basis accident / Proceedings of International Congress on Advances in Nuclear Power Plants 2010, ICAPP 2010. San Diego, CA, 2010. – PP. 186-192.
19. Григорьев М.М., Плаксеев А.А., Подпорина Н.А. Мощностные характеристики системы пассивного отвода тепла АЭС с ВВЭР-1000 в зависимости от параметров среды в парогенераторе. / Сборник докладов VI Международного семинара по горизонтальным парогенераторам. – Подольск, 2006.
20. Kopytov I.I., Kalyakin S.G., Berkovich V.M., Morozov A.V., Remizov O.V. Experimental investigation of non-condensable gases effect on Novovoronezh NPP-2 steam generator condensation power under the condition of passive safety systems operation / Proceedings of the 17-th International Conference on Nuclear Engineering 2009, ICONE17. Brussels, 2009. – PP. 735-743.

21. *Калякин С.Г., Ремизов О.В., Морозов А.В., Юрьев Ю.С., Климанова Ю.В.* Обоснование проектных функций системы пассивного залива GE-2 усовершенствованного проекта АЭС с реактором ВВЭР // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2003. – № 2. – С. 94-101.

Поступила в редакцию 07.06.2016 г.

Авторы

Шлёпкин Александр Сергеевич, аспирант

E-mail: alekstqel@mail.ru

Морозов Андрей Владимирович, ведущий научный сотрудник, доктор техн. наук

E-mail: sas@ippe.ru

Калякин Дмитрий Сергеевич, старший научный сотрудник, кандидат техн. наук

E-mail: dkalyakin@ippe.ru

Сошкина Александра Сергеевна, младший научный сотрудник

E-mail: sas@ippe.ru

UDC 621.039.58:536.423.4

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF HEAT MASS EXCHANGE PROCESSES AT THE VVER STEAM GENERATOR IN EMERGENCY CONDENSING MODE

Shlyopkin A.S., Morozov A.V., Kalyakin D.S., Soshkina A.S.

JSC «SSC RF-IPPE»

1 Bondarenko sq., Obninsk, Kaluga reg., 249033 Russia

ABSTRACT

To evaluate the efficiency of the VVER steam generator and investigation of the influence of the initial conditions of the accident on the processes of heat exchange in the steam generator (SG) tube bundle, the «GE2M-PG» facility was constructed at the JSC «SSC RF-IPPE». It was used in two series of experiments with and without removal of the steam-gas mixture (SGM) of the steam generator cold collector.

In experiments with removal of the steam-gas mixture, it was found that the condensation of the steam generator power is largely dependent on the volume of gas concentration in a vapor stream, while their ratio in the gas mixture, as well as the physical properties of the gases do not have a noticeable effect on the SG condensation power. In addition, evaluations were made of the influence of the SGM flow removal from the cold collector on the steam generator operation in condensing mode. It turned out that a decrease ~ 25% in the SGM removal of the condensing power of the steam generator is reduced by ~ 28%.

The experiments without removal of the gas-vapor mixture made it possible to assess the impact of various non-condensable gases on the heat exchange process. It has been found that, in addition to the direct reduction of the heat transfer coefficient, the non-condensable gases have a negative impact on the passive heat removal system capacity. At the same time, the higher the accumulation rate of gases, the passive heat removal system power is greatly reduced. Also, a dependency was derived of temperature differences between the circuits, the steam generator power and the concentration of non-condensable gases.

Key words: PWR, steam generators, passive safety systems, passive heat removal system, non-condensable gases, steam-gas mixture.

REFERENCES

1. Kopytov I.I. «NPP-2006» project – the basis of the federal target program «Development of the nuclear power industry of Russia in 2007-2010 and goals for the future up to 2015». Abstracts of the Second International Scientific and Technical Conference «Safety, Efficiency and Economics of Nuclear Power Industry». Moscow. VNIIAES Publ., 2008, pp. 60-65 (in Russian).
2. Kalyakin S.G., Sorokin A.P., Brewers V.A., Pometko R.S., Selivanov Y.U. Morozov A.V., Remizov O.V. Experimental research of thermal physical processes for the safety substantiation of new generation VVER. *Atomnaya energiya*. 2014, v. 116, iss. 4, pp. 241-246 (in Russian).
3. Remizov O.V., Morozov A.V., Tsyganok A.A. Heat transfer between the condensing steam and boiling water in a multiple-row horizontal tube bundle with natural convection. *Izvestiya Akademii Nauk. Energetika*. 2010, no. 2, pp. 152-158 (in Russian).
4. Ilchenko A.G., Zuev A.N., Haritonin I.E. Study of VVER-1000 unit operation in the mode of natural circulation of coolant. *Vestnik IGEU*. 2016, no. 2, pp. 1-5 (in Russian).
5. Morozov A.V., Remizov O.V. Modern development of passive heat removal systems of water-cooled reactors. *VANT. Ser. Physics of nuclear reactors*. 2013, iss. 2, pp. 61-78 (in Russian).
6. Morozov A.V., Remizov O.V., Tsyganok A.A. Non-condensable gases effect on heat transfer processes between condensing steam and boiling water in heat exchanger with multirow horizontal tube bundle. Proceedings of 14-th International Heat Transfer Conference, IHTC14, 2010. pp. 629-635.
7. Morozov A.V., Remizov O.V. Experimental substantiation of the design features of passive core flooding system of the VVER reactor. *Teploenergetika*. 2012, no. 5, pp. 22-27 (in Russian).
8. Morozov A.V., Shlepkin A.S. Analysis of the effect of operating factors on the operation of model of VVER steam generator in a mode of steam condensation. *VANT. Ser. Nuclear and reactor constants*. 2016, no.3, pp. 91-99 (in Russian).
9. Welter K.B., Bajorek S.M., Woods B., Groome J., Reyes J.N. Confirmatory testing investigating advanced passive plant thermal-hydraulics. Proceedings of 13-th International Conference on Nuclear Engineering, 2005, 256-264.
10. Gautier AL. Passive heat removal system with the «Base Operation Passive Heat Removal» strategy. Application with Primary Heat Exchangers. Proc. of ICONE 7, 1999, pp. 174-187.
11. Brettschuh W., Meseth J. Experimental verification of SWR 1000 passive components and systems. Proceedings of ICAPP 2007, 2007, pp. 74-76.
12. Schmidt H. Large Scale Verification of External RPV Cooling in Case of Severe Accident. Proc. of ICAPP'04, 2004, pp. 564-576.
13. Huggenberger M., Aubert C., Dreier J., Fischer O., Strassberger H.J. New passive decay heat removal tests in PANDA. Proc. of 6-th International Conference on Nuclear Engineering ICONE-6264, 1998, pp. 301-310.
14. Bezlepkin V.V. Semashko S.E., Sidorov V.G., Ivanov I.M., Zatevakhin M.A., Alekseev S.B. Design and experimental study of passive systems in the project of Leningrad NPP-2. Proceedings of the Second International Scientific and Technical Conference «Safety, Efficiency and Economics of Nuclear Power Industry». Moscow. VNIIAES Publ., 2008, pp. 937-942 (in Russian).
15. Glaeser H. Uncertainty evaluation of thermal-hydraulic code results. International meeting on «Best-Estimate» Methods in Nuclear Installation Safety Analysis (BE-2000). Washington, DC (2000).
16. Morozov A.V., Shlyopkin A.S. The study of the model of VVER steam generator in condensing mode for different parameters of the emergency process. Proceedings of the IV International Scientific Conference «Innovative projects and nuclear energy technologies» (IRTC NIKIET-2016). Moscow. NIKIET Publ., 2016, pp. 245-261 (in Russian).
17. Morozov A.V., Remizov O.V. Experimental study of the steam generator VVER models in condensing mode. *Teploenergetika*. 2012, no. 5, pp. 16-21 (in Russian).
18. Berkovich V.M., Peresadko V.G., Taranov G.S., Remizov O.V., Morozov A.V., Tsyganok A.A., Kalyakin D.S. Experimental study on Novovoronezh NPP-2 steam generator model

condensation power in the event of the beyond design basis accident. Proceedings of International Congress on Advances in Nuclear Power Plants 2010, ICAPP 2010. San Diego, CA, 2010, pp. 186-192.

19. Grigoriev M.M., Plakseev A.A., Podporina N.A. Power characteristics of the system of passive heat removal of VVER-1000, depending on the parameters of the medium in the steam generator. Proceedings of the 6-th International seminar on horizontal steam generators, Podolsk, 2006 (in Russian).

20. Kopytov I.I., Kalyakin S.G., Berkovich V.M., Morozov A.V., Remizov O.V. Experimental investigation of non-condensable gases effect on Novovoronezh NPP-2 steam generator condensation power under the condition of passive safety systems operation. Proceedings of the 17-th International Conference on Nuclear Engineering 2009, ICONE17. Brussels, 2009, pp. 735-743.

21. Kalyakin S.G., Remizov O.V., Morozov A.V., Yuriev Y.U., Klimanova Y.U. Substantiation of project features of GE-2 passive flooding system of advanced nuclear power plants project with VVER. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*. 2003, no. 2, pp. 94-101 (in Russian).

Authors

Shlyopkin Aleksandr Sergeevich, PhD Student

E-mail: alekstqel@mail.ru

Morozov Andrej Vladimirovich, Leading Researcher, Dr. Sci. (Engineering)

E-mail: sas@ippe.ru

Kalyakin Dmitrij Sergeevich, Senior Researcher, Cand. Sci. (Engineering)

E-mail: dkalyakin@ippe.ru

Soshkina Aleksandra Sergeevna, Junior Researcher

E-mail: sas@ippe.ru