

СТАТЬИ

УДК 621.039.58

ИССЛЕДОВАНИЕ РАСХОЛАЖИВАНИЯ МОДЕЛИ ТВС-2М ПРИ ПОВТОРНОМ ЗАЛИВЕ

Сергеев В.В., Лощинин В.М., Гальченко Э.Ф. (АО «ГНЦ РФ — ФЭИ», г. Обнинск)

e-mail: vvs@ippe.ru

Проекты АЭС-2006 и ВВЭР-ТОИ предусматривают увеличение тепловой мощности установки до 3200—3300 МВт. Надежное охлаждение активной зоны при повышенных тепловых потоках ТВС достигается специальными решетками-интенсификаторами тепло- и массообмена, называемыми перемешивающими.

Теплогидравлика ТВС новых конструкций экспериментально исследована в условиях нормальной эксплуатации. Основное внимание уделялось обоснованию поддержания теплотехнических запасов, прежде всего запаса до кризиса теплообмена на безопасном уровне. Поведение ТВС ВВЭР с решетками-интенсификаторами в условиях аварии с потерей теплоносителя экспериментально не исследовалось. Такая авария характеризуется частичным или полным обезвоживанием активной зоны, сопровождаемым ухудшением теплоотвода от твэлов и их быстрым разогревом. Для предотвращения разрушения твэлов из системы аварийного расхолаживания в активную зону подается охлаждающая вода. Температура оболочек твэлов и темп их расхолаживания при повторном заливе осушенной активной зоны зависят от конфигурации и расположения решеток. Каждый новый тип решеток требует экспериментальной проверки их влияния на теплообмен и скорость расхолаживания ТВС [1].

Оборудование и методика проведения опытов. Эксперименты по повторному заливу 37-стержневой модели топливной сборки проведены на петле повторного залива стенда СВД-1 отделения теплофизики АО «ГНЦ РФ — ФЭИ».

Модель ТВС представляет собой сборку имитаторов твэлов в шестигранном стальном корпусе с внутренним размером «под ключ»

81,8 мм. Имитаторы твэлов диаметром 9,15 мм с оболочкой из коррозионно-стойкой стали толщиной 0,6 мм обогревали на длине 3530 мм пропусканием электрического тока по нихромовому стержню переменного сечения, изолированному от оболочки, уплотненному оксидом магния. Распределение энергосвечения по высоте было 5-ступенчатым с коэффициентом неравномерности 1,48. В пучке использовались имитаторы трех типов, которые отличались высотным и азимутальным расположением спаев термпар, измерявших температуру внутренней поверхности оболочек имитаторов.

В пучке с шагом 340 мм установлены 12 дистанционирующих решеток из коррозионно-стойкой стали. В пролетах между ними в верхней части пучка на расстоянии 140 мм от верхнего края решеток устанавливали по две перемешивающие решетки типа «прогонка» и «вихрь».

Режим повторного залива моделировали путем подачи воды снизу или сверху в рабочий участок после предварительного осушения и прогрева модели и петли сухим насыщенным паром рабочего давления после стабилизации режимных параметров и мощности на рабочем участке. Сигналом для пуска воды служило повышение температуры оболочек имитаторов твэлов до заданной стартовой. Регистрация параметров в опытах прекращалась при снижении температуры имитаторов до уровня, характерного для кипения. Часть опытов была выполнена с обогревом корпуса модели ТВС. Мощность обогрева составляла 4,5 кВт.

В опытах измеряли следующие параметры: давление в верхней и нижней камерах рабочего участка, расход воды и пара, температуру воды

Режимные параметры опытов

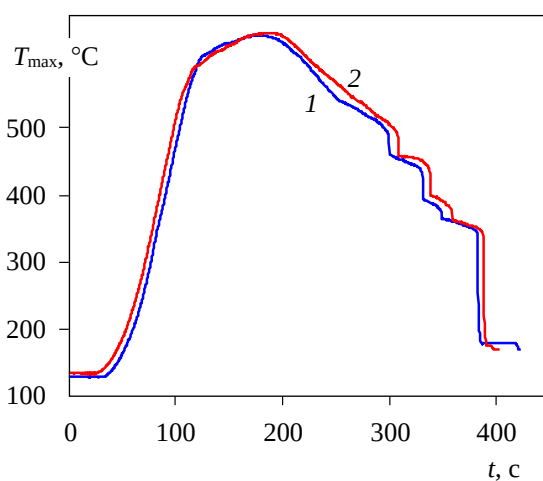
Опыт №	Максимальная мощность пучка, кВт	Давление в верхней камере, бар	Скорость залива, см/с	Температура воды, °С	Стартовая температура, °С	Вид залива
Модель ТВС-2М без перемешивающих решеток						
47	144,8	2,00	8	103,8	500	Залив снизу
48	144,6	2,10	7,9	104,2	500	
49	145,6	1,96	8	104,3	500	
50	144,8	1,88	8	104,0	700	
51	176,4	1,99	8	104,2	500	
59	51,0	2,13	6,4	107,8	500	Залив сверху
60	50,9	1,93	6,6	104,9	500	
Модель ТВС-2М с перемешивающими решетками						
80	174,7	2,09	8,1	108,1	500	Залив снизу
85	51,7	1,93	6,8	107,1	500	Залив сверху
86	52,3	2,03	6,9	107,7	500	

Примечание. Опыты № 48, 49, 60, 86 с обогревом корпуса модели.

Примечание. Опыты № 48, 49, 60, 86 с обогревом корпуса модели.

на входе и пара на выходе из модели, температуру оболочек имитаторов, мощность, подводимую к пучку стержней, перепад давления на модели ТВС, в верхней камере и сосуде для сбора унесенной влаги. Суммарная погрешность измерения параметров в опытах составила, %: давление 0,5, перепад давления 1, расход 2, мощность 1, температура 1.

Результаты исследований. Типичное изменение максимальной температуры имитаторов при разогреве и расхолаживании модели ТВС-2М без перемешивающих решеток в условиях повторного залива снизу показано на рис. 1, воспроизводящем результаты опытов.

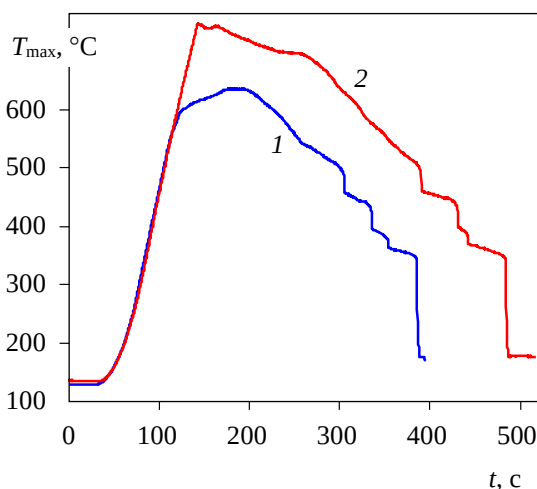


Р и с. 1. Максимальная температура стержней в опыте № 48 (1) и 49 (2)

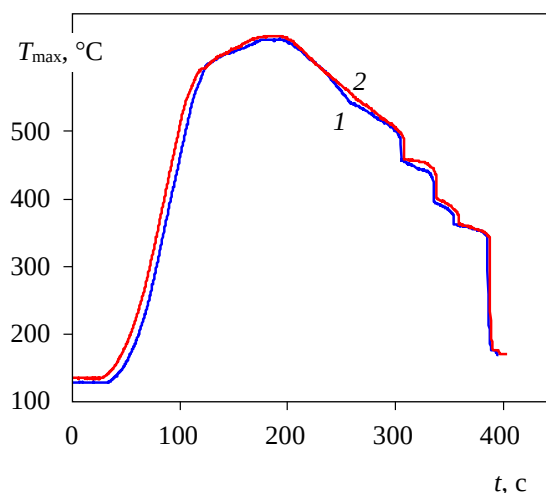
Режимные параметры опытов, результаты которых приведены на этом и других рисунках, приведены в таблице.

Анализ показывает, что при нижнем заливе обеих моделей ТВС-2М максимальная температура стержней и время расхолаживания сборок возрастают с повышением стартовой температуры, влияние обогрева корпуса на эти параметры незначительно (рис. 2, 3).

Возрастание мощности пучка приводит к повышению максимальной температуры стержней и времени расхолаживания сборок, в то время как увеличение скорости залива дает об-



Р и с. 2. Влияние стартовой температуры стенки 500 и 700 °C на максимальную температуру стержней в опыте № 47 (1), 50 (2) соответственно

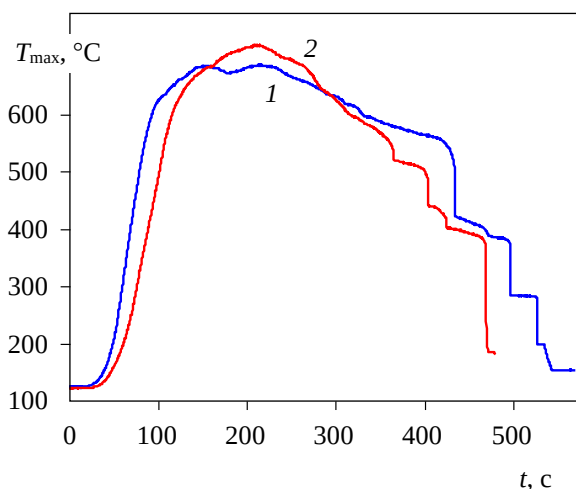


Р и с. 3. Влияние обогрева корпуса на максимальную температуру стержней в опыте № 47 (1), 49 (2)

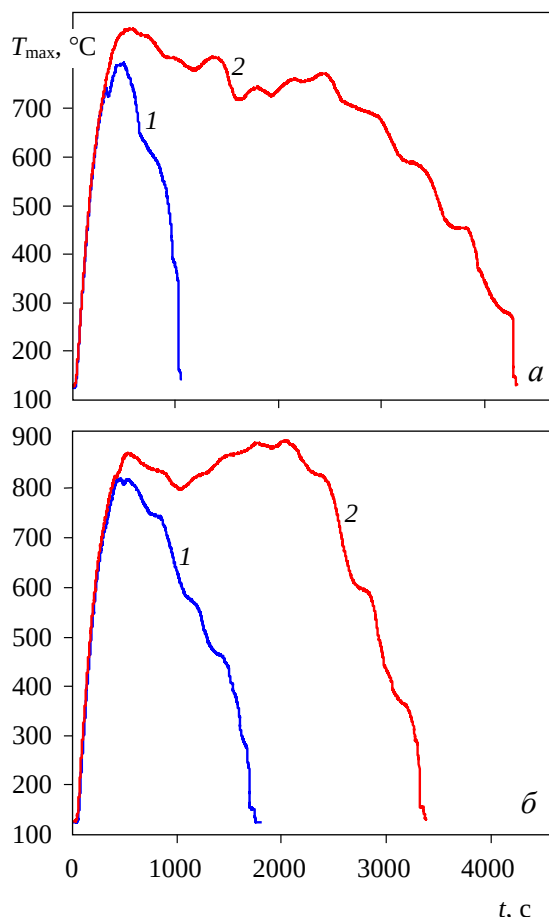
ратный эффект. Наличие в модели ТВС-2М перемешивающих решеток приводит к снижению максимальной температуры стержней и возрастанию времени расхолаживания сборки (рис. 4). Аналогичные результаты были получены ранее на моделях ТВС PWR [2].

Опыты с верхним заливом при стартовой температуре 500 °С удалось провести только при мощности пучка около 50 кВт, поскольку при большей мощности пучок не расхолаживался. По этой же причине для проведения опытов при стартовой температуре 700 °С мощность пучка была снижена примерно до 26 кВт.

Из анализа экспериментальных данных следует, что при верхнем заливе наличие перемешивающих решеток приводит к росту максимальной температуры стержней и времени рас-



Р и с. 4. Влияние перемешивающих решеток на максимальную температуру стержней: 1, 2 — опыт № 80 и 51 с перемешивающими решетками и без них соответственно



Р и с. 5. Влияние обогрева корпуса модели ТВС без перемешивающих решеток (а) и с их наличием (б) на максимальную температуру стержней при верхнем заливе в опыте № 59, 85 без обогрева корпуса (1) и 60, 86 с обогревом (2)

холаживания сборки. Влияние скорости залива аналогично наблюдаемому при нижнем заливе: с ростом скорости максимальная температура стержней и время расхолаживания сборки уменьшаются. Более всего на этих параметрах сказывается обогрев корпуса модели, вследствие чего повышается температура стержней, время расхолаживания сборки возрастает более чем в 2 раза (рис. 5).

При верхнем заливе попаданию охлаждающей воды в центральную часть сборки препятствует встречный поток образующегося при вскипании пара. Поэтому при отсутствии обогрева корпуса модели расхолаживание обеспечивается, в основном, водой, проникающей в нижнюю часть сборки по ее периферии. Обогрев корпуса препятствует этому процессу, что и приводит к значительному возрастанию времени расхолаживания. В штатных ТВС нет обогреваемого

корпуса, однако полученные на модели ТВС данные о влиянии обогрева корпуса могут быть полезны для верификации и уточнения моделей повторного залива расчетных кодов.

Таким образом, эксперименты показали отсутствие существенного влияния перемешивающих решеток на эффективность расхолаживания ТВС-2М в условиях повторного залива.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Yadigaroglu G., Nelson R.A., Teschendorff V. e.a. Modeling of reflooding. — Nucl. Engng Design, 1993, v. 145, № 1, p. 1—35.
2. Murao Y., Iguchi T., Sugimoto J. e.a. Thermal-hydraulic model for reflooding phenomena in PWR-LOCA. — In: Proc. 6th Intern. Topical Mtg on Reactor Thermal Hydraulics. France, Grenoble, 1993, Oct. 5—8, v. 1, p. 723—732.

Поступила в Редакцию 13.09.19

УДК 621.039.532

МОДЕЛИРОВАНИЕ МАССОПЕРЕНОСА ПРОДУКТОВ КОРРОЗИИ СТАЛИ В КОНТУРАХ С НАТРИЕМ

Алексеев В.В., Сорокин А.П., Кузина Ю.А. (АО «ГНЦ РФ — ФЭИ», г. Обнинск)

e-mail: alexeev@ippe.ru

Использование жидких металлов в качестве теплоносителей позволяет создать высокоэффективные энергетические установки, в том числе в ядерной энергетике. Повышение эффективности, ресурса и безопасности работы установок, возможность создания ЯЭУ с более высокими параметрами в значительной степени определяются обоснованием физико-химических процессов в системе теплоноситель—конструкционный материал—примеси.

Важными проблемами, которые должны быть решены при создании и эксплуатации ЯЭУ с натриевым теплоносителем, являются коррозия и массоперенос конструкционных материалов. В результате массопереноса возможно как ухудшение свойств конструкционных материалов, так и сужение, забивание проходных сечений каналов гидравлического тракта реактора, что приводит к снижению безопасности. Экспериментальные исследования на крупномасштабных установках для выявления указанных эффектов дороги, иногда и невозможны. Моделирование массопереноса в контурах промышленных ЯЭУ с жидкометаллическими теплоносителями на экспериментальных установках в полном объеме не проводилось. Наиболее подробную информацию могут дать расчетно-теоретические методы исследования. В настоящее время разработка таких методов для рассматриваемого класса задач находится в начальной стадии. Отсутствует замкнутая система уравнений, известные расчетные оценки

недостаточно обоснованы, отсутствуют физико-химические константы.

Массоперенос продуктов коррозии в натриевых контурах ЯЭУ моделируется для определения условий, обеспечивающих эффективное функционирование теплоносителя и конструкционных материалов, в том числе определение допустимого повышения температуры теплоносителя и содержания примесей, получение количественных данных о выходе и накоплении твердофазных примесей в элементах гидравлического тракта и газовых полостях.

Коррозия стали в натрии. Коррозионное взаимодействие между натрием и конструкционными материалами представляет собой сложный физико-химический процесс, в котором определяющими являются следующие составляющие:

растворение компонентов конструкционных материалов в натрии;

образование сплавов и химических соединений компонентов конструкционных материалов с натрием и примесями, содержащимися в натрии;

проникновение натрия в конструкционный материал;

массоперенос в жидком натрии в результате температурного и концентрационного переноса.

Наиболее агрессивной примесью в натрии является кислород, который образует с компонентами стали и сплавов сложные оксиды типа $\text{Na}_x\text{Me}_y\text{O}_z$. Образование таких соединений возможно с Fe, Cr, Ni, Mo. Пороговый уровень кис-