

была продемонстрирована в натуральных условиях (рис. 6). В процессе эксплуатации на двух реакторах были однозначно выявлены разгерметизированные трубные коммуникации как в пределах реактора, так и вне его. При этом полезный сигнал превысил фоновый шум в режиме опрессовки в 3000 раз, а при работе реактора на мощности в 350 раз (разрешающая способность метода по отношению к соседним ТК — 5 раз). Для оценки развития разгерметизации во времени на 20 верхних трактах произвольно выбранных ТК, в том числе и на ТК с разгерметизацией в течение 15 ч с периодичностью 1 ч, были измерены шумы. Установлено, что в ТК с разгерметизацией СПМШ рабочего диапазона выросла на 10 дБ, в остальных ТК каких-либо изменений не зарегистрировано. Это указывало на наличие в данном тракте сравнительно быстро развивающейся разгерметизации.

В этом методе для контроля герметичности использовалось два информативных признака,

однако при необходимости число признаков можно увеличить и тем самым повысить надежность определения аномалий. Это одно из преимуществ такого метода контроля. В заключение можно отметить, что сам контроль акустических шумов и в совокупности с контролем шумов других видов, а также с контролем технологических параметров реактора может значительно расширить объем информации по диагностике состояния реактора, что позволит повысить надежность, безопасность и экономичность эксплуатации реактора и АЭС.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Емельянов И. Я., Клемиц А. П., Поляков Е. Ф. — Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт, 1977, № 1, с. 13.
2. Емельянов И. Я., Гаврилов П. А., Селиверстов Б. П. Управление и безопасность ядерных энергетических реакторов. М., Атомиздат, 1975.

Поступила в Редакцию 16.01.81

УДК 621.039.526

Исследование модели парогенератора для БН-600 на установке БОР-60

ЦЫКАНОВ В. А., ЛУКАСЕВИЧ Б. И., КИРИЛЛОВ П. Л., БАЙ В. Ф., БРИТОВ В. Н., БУХТЕЕВ И. С., ГОЛОВАНОВ В. Н., ГРАЧЕВ Н. С., ГУБАНОВ В. М., КОНДРАТЬЕВ В. И., НЕЧАЕВ Б. Н., НИКОЛЬСКИЙ Р. В., ТИТОВ В. Ф., ТУРЧИН Н. М.

Конструкция парогенератора. На установке БОР-60 проводятся ресурсные испытания модели парогенератора ПГН-200М для АЭС БН-600 (Титов В. Ф. и др. Парогенератор атомной электростанции БН-600. Докл. на сов. фр. семинаре. Димитровград, 1975). Модель парогенератора состоит из двух моделей (испарителя и пароперегревателя), растопочного оборудования, установленного между испарителем и пароперегревателем, и трубопроводов обвязки по рабочим средам, подключенных к циркуляционному контуру установки БОР-60 (рис. 1). Конструктивно модель отличается от парогенератора ПГН-200М (без модуля промежуточного перегрева) укороченной длиной труб.

Модуль испарителя представляет собой вертикальный теплообменник с прямыми трубами и сильфонным компенсатором на корпусе. В нижней камере на входе в каждую трубу установлены дроссельные шайбы, поддерживаемые прижимной решеткой. В верхней камере внутрь каждой трубы введены тонкостенные вставки для защиты мест заделки труб в трубные доски от пульсации температуры пара на выходе из труб. На трубных досках со стороны натрия расположена тепловая защита, предохраняющая несущие элементы от тепловых ударов при резких изменениях температуры натрия в аварийных режимах. Трубный

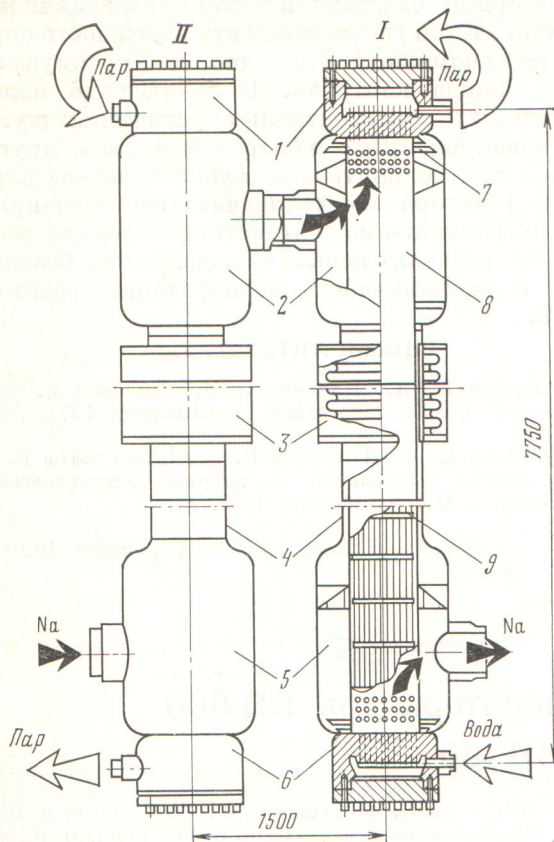
пучок модуля испарителя длиной 7,2 м состоит из 349 труб диаметром $16 \times 2,5$ мм и изготовлен, как и корпус, из стали 1Х2М. Дистанционирующие решетки с калиброванными отверстиями диаметром 16,3 мм расположены друг от друга на расстоянии 828 мм.

Модуль пароперегревателя острого пара конструктивно аналогичен модулю испарителя и отличается от него меньшим числом труб теплообменного пучка и применяемыми материалами. Трубный пучок модуля пароперегревателя длиной 7,2 м состоит из 239 труб диаметром $16 \times 2,5$ мм и изготовлен из стали Х18Н9. Дистанционирование труб в трубном пучке такое же, как и в модуле испарителя. В верхней (входной по пару) камере пароперегревателя в теплообменные трубы установлены вставки тепловой защиты.

Растопочная система работает только в режиме пуска — до выхода парогенератора на режим с нормальными параметрами после испарителя (температура перегрева пара за испарителем по проекту не должна быть меньше 20°C).

В процессе пусконаладочных работ и ресурсных испытаний модели парогенератора в течение 6700 ч выполнены некоторые исследования, результаты которых представлены в настоящей статье.

Разогрев парогенератора. Перед заполнением парогенератора натрием необходимо разогреть его



Р и с. 1. Парогенератор: I — модуль испарителя; II — модуль пароперегревателя острого пара; 1 — паровые камеры испарителя и пароперегревателя; 2 — входная и выходная натриевые камеры испарителя и пароперегревателя; 3 — сильфонные компенсаторы модулей; 4 — корпуса модулей; 5 — входная и выходная натриевые камеры парогенератора; 6 — камеры питательной воды и острого пара; 7 — тепловые экраны; 8 — обечайка трубного пучка; 9 — дистанционирующая решетка

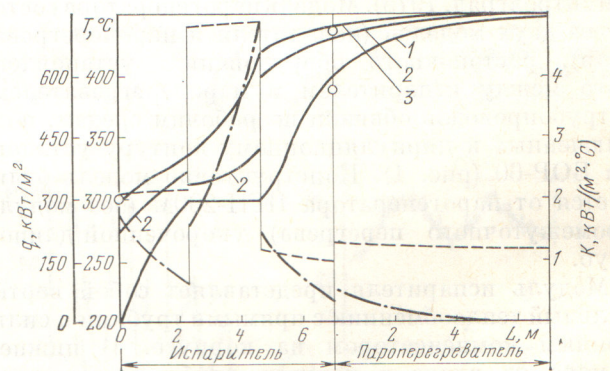
с помощью электрообогрева до 200—250 °С. При выборе режима разогрева парогенератора с прямотрубным пучком существуют жесткие ограничения на скорость изменения температуры корпуса парогенератора. При скорости изменения температуры корпуса парогенератора выше определенного значения из-за разности температуры в сечении трубного пучка в центральных трубах могут возникнуть недопустимые осевые усилия. Экспериментально показано, что скорость разогрева корпусов ПГН-200М не должна превышать 3°С/ч, что соответствует разности температуры между периферийной и центральной трубами не более 40°С в течение всего времени разогрева корпуса. Установлено, что на температурное поле труб существенно влияет теплопроводность вдоль труб, поскольку трубная доска испарителя прогревается значительно быстрее трубного пучка.

Исследование виброактивности трубных пучков. Фактический уровень вибрации трубных пучков

измеряли в трубах трех периферийных рядов пучков пароперегревателя и испарителя на уровнях дистанционирующих решеток и середины пролетов между ними, а также в аналогичных местах труб центральной части пучков.

Измеряемым параметром вибрации трубных пучков парогенератора являлось виброускорение. Вибрация труб в режимах циркуляции теплоносителя по второму контуру с расходом до 470 м³/ч, а также в момент отключения насоса не превысила 0,3 g как в трубах периферийных рядов, так и в центральной части трубных пучков испарителя и пароперегревателя. На основании этого сделан вывод о достаточной вибропрочности конструкции парогенератора в исследованном диапазоне расходов. Резонансные колебания труб в момент пуска насоса и увеличения расхода теплоносителя от 0 до 470 м³/ч измерениями не обнаружены.

Теплогидравлические характеристики. Сравнение фактических параметров парогенератора на различных уровнях мощности с расчетными показывает хорошую сходимость расчета и эксперимента. Распределение теплотехнических параметров по парогенератору на номинальном режиме приведено на рис. 2. По измерениям расхода воды, проводившимся на 10 трубах испарителя, а также по измерениям температуры пара на выходе из 20 труб испарителя установлено, что парогенерирующие трубы испарителя по теплопередаче находятся в относительно одинаковых условиях. Расход воды в трубах слабо зависит от места положения их в пучке, что свидетельствует о равномерном распределении потоков воды в прямотрубном пучке.



Р и с. 2. Распределение теплофизических характеристик по длине трубных пучков парогенератора. Режим работы парогенератора — по натрию: расход 430 м³/ч, температура на входе в парогенератор 450°С; по воде: расход 30 т/ч, температура питательной воды 200°С, давление 8,7 МПа; 1 — температура натрия; 2 — температура внутренней поверхности труб теплообмена; 3 — температура воды (пара); — — — коэффициент теплопередачи K , кВт/(м²·°С); — · — — тепловой поток q , кВт/м²; ○ — экспериментальные значения температуры

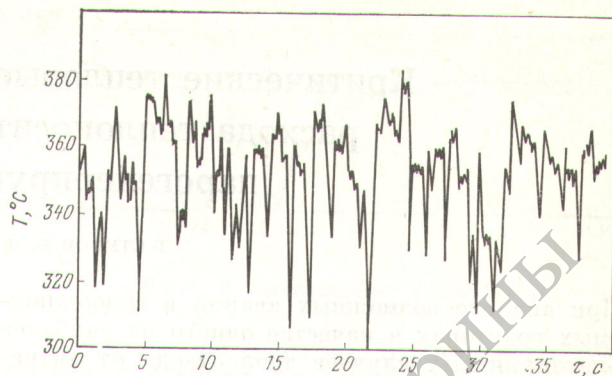
Вынос влаги из испарительных труб. При температуре пара 300—400 °С и давлении 8,0—9,0 МПа на выходе из труб испарителя наблюдается вынос влаги в верхнюю камеру испарителя, что отмечено показаниями термозондов, установленных на выходе 20 испарительных труб (рис. 3). Вынос влаги из верхней камеры испарителя в паропровод наблюдается при перегревах пара на выходе из испарителя ниже 50 °С. Однако на входе в пароперегреватель при этом никаких пульсаций не было, что свидетельствует о наступлении равновесия температуры в потоке слабоперегретого пара в пределах паропровода между испарителем и пароперегревателем.

При анализе корреляционных функций температуры пара на выходе из труб испарителя, общего расхода воды через испаритель, расхода воды по трубам установлена незначительная корреляция между пульсациями температуры пара на выходе из труб и пульсациями расхода по трубам, а также пульсациями общего расхода через испаритель. В связи с этим можно считать, что основной вклад в пульсации температуры пара на выходе из труб испарителя обусловлен термодинамической неравновесностью потока.

Пусковые и переходные режимы. На парогенераторе опробованы два режима пуска — с постоянным и переменным расходом натрия. По результатам тензометрических исследований каких-либо существенных различий в этих режимах не замечено. Скорость изменения температуры натрия не превышала 72 °С/ч. При пуске в некоторых узлах возникало кратковременное напряжение, вызванное быстрым изменением температуры в третьем контуре (в патрубке питательной воды в момент подачи воды в испаритель и в паровом патрубке пароперегревателя при его подключении). С увеличением мощности напряжение во всех элементах парогенератора (кроме камеры питательной воды) монотонно увеличивается, не превышая допустимого уровня.

Как показали результаты измерений, при переходных режимах в парогенераторе во время срабатывания медленной аварийной защиты реактора наиболее неблагоприятным для парогенератора является период, обусловленный отключением подогревателя высокого давления, которое приводит к резкому снижению температуры питательной воды с 200 до 160 °С. Однако и в этом случае изменения напряжения в элементах конструкции не превышали допустимых значений.

Водный режим и накипеобразование. Для водного режима первого периода эксплуатации парогенератора длительностью 6700 ч характерно нейтральное значение pH. По большинству основных показателей качество питательной воды соответ-



Р и с. 3. Запись показаний терморезистора, установленного на выходе испарительной трубы. Режим работы парогенератора как на рис. 2, перегрев пара в испарителе 390° С

ствовало нормам, принятым для этого периода. Исключение составляло присутствие в питательной воде свободной углекислоты и повышенное содержание железа, находившегося в основном в питательной воде в виде взвеси. После 2000, 4500 и 6700 ч были проведены инспекционные проверки состояния поверхностей парогенератора со стороны третьего контура.

После 2000 ч работы парогенератора установлено наличие во входной камере пароперегревателя незначительного количества отложений в испарительных трубах (толщиной до 0,1 мм). Плотность рыхлых отложений в испарительных трубах составляла от 10 до 30 г/м². Отложения располагались главным образом на участках подогрева и развитого кипения. Изменений в показаниях датчиков технологического контроля не обнаружено, за исключением перепада на дросселях. Заметных изменений в теплопередаче в течение всего периода эксплуатации не наблюдалось.

Распределение отложений в камерах испарителя и пароперегревателя после работы парогенератора в течение от 4600 до 6700 ч соответствовало состоянию предыдущих периодов. Не наблюдалось забивания дросселей. Входные и выходные отверстия дросселей не имели отложений. Поскольку по оценке плотность отложений в испарительных трубах достигала 150 г/м², были вырезаны одна испарительная и одна пароперегревательная трубы, которые в настоящее время исследуются.

Результаты первого этапа эксплуатации модели парогенератора на БОР-60 в основном подтвердили конструкторские решения по парогенератору ПГН-200М и дали дополнительную информацию, которая была использована при их пуске на АЭС БН-600.