$$D_j(t)=\frac{\omega_j(t)}{k_j(t)}\Big\{\sum_{i=1}^{r}\sum_{\alpha\in\{a_{\alpha j}<a_{ij}\}}(N_j-a_{ij}+1)\times$$

$$\times B_t^{(j)}(a_{ij}-1)\prod_{\substack{l=1\\(l\neq j)}}^{n}\Big[\sum_{\gamma=\text{макс}(a_{ij},\,a_{\alpha j})}^{N_l}B_t^{(l)}(\gamma)+$$

$$+\sum_{\alpha=1}^{r}\sum_{\substack{\beta=\alpha+1\\ \alpha,\,\beta\in\{a_{\alpha j}=a_{\beta j}=b_j\}}}^{r-1}(N_j-b_j+1)\times$$

$$\times B_t^{(j)}(b_j-1)\prod_{\substack{l=1\\(l\neq j)}}^{n}\Big[\sum_{\gamma=\text{макс}(a_{\alpha l},\,a_{\beta l})}^{N_l}B_t^{(l)}(\gamma)\Big]\Big\}. \quad (18)$$

Следует заметить, что формулы (15) — (18) справедливы и для АЭС с неблочной структурой, т. е. когда $N_j=1$, $j=\overline{1,\,n}$. В этом случае блок совпадает с элементом, КГСБ «вырождается» в КГЭ, а формулы (15) — (18) совпадают с соотношениями, приведенными в работе [3] для расчета коэффициента готовности и параметра потока отказов системы. Расчеты показали, что для АЭС с блочной структурой соотношения (15) — (18) позволяют не только снизить трудоемкость вычислений, но и повысить точность получаемых оценок (например, по сравнению с методом расчета через КГЭ).

По известным показателям надежности АЭС относительно фиксированных уровней мощности N_s, где $s=\overline{1,\,\hat{s}}$, можно вычислить и различные интегральные показатели надежности: коэффициент использования установленной мощности, коэффициент технического использования и т. п. Например, коэффициент использования установленной мощности (в случае базового режима эксплуатации) за время t определяется из соотношений

$$\varphi=\frac{\int_0^t\overline{N}_{\text{р}}(\tau)\,d\tau}{t}(1-\delta); \quad (19)$$

$$\overline{N}_{\text{р}}(\tau)=\sum_{s=1}^{\hat{s}}N_s\,[K_{\text{г}}(N_s,\,\tau)-K_{\text{г}}(N_{s+1},\,\tau)],$$

где N_s принимает значения от $N_1=0$ до $N_{\hat{s}}=1$; $\overline{N}_p(\tau)$ — средняя располагаемая мощность АЭС в момент τ; δ — доля времени плановых простоев АЭС за период t.

Таким образом, предложенная математическая модель и основанный на ней метод расчета структурной надежности АЭС являются достаточно универсальными, обладают рядом преимуществ перед существующими и удобны в инженерных приложениях. Модель и метод апробированы в практических расчетах различных типов АЭС и положены в основу первой отечественной нормативной методики (руководящего технического материала) по расчету структурной надежности АЭС и их систем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Клёмин А. И., Поляков Е. Ф.**— Атомная энергия, 1980, т. 48, вып. 2, с. 70.
2. **Барлоу Р., Прошан Ф.** Математическая теория надежности. М., Советское радио, 1969.
3. **Емельянов И. Я. и др.**— Атомная энергия, 1974, т. 37, вып. 5, с. 408.
4. **Рябинин И. А.** Основы теории и расчета надежности судовых электроэнергетических систем. Л., Судостроение, 1967.
5. **Клёмин А. И., Песков Р. А., Фролов Э. В.**— Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика и техника ядерных реакторов, 1980, вып. 1 (10), с. 3.

Поступила в Редакцию 18.11.80

УДК 621.039.564.2.5

Реакторная шумометрия и ее применение для контроля герметичности циркуляционного контура реакторов

ЕМЕЛЬЯНОВ И. Я., ЛЫСИКОВ Б. В., ПРОЗОРОВ В. К., СТРЕЛКОВ Б. П.

В связи с широким развитием АЭС улучшение экономичности, безопасности и надежности их работы продолжает оставаться одной из наиболее актуальных задач отечественной ядерной энергетики [1]. Одним из эффективных путей решения этой проблемы является совершенствование устройств и систем контроля реакторов. В последние годы для контроля используются некоторые реакторные шумы [2], в частности нейтронный, акустический, температурный, пульсаций давления и расхода и др. С их помощью можно контролировать вскипание теплоносителя, кризис теплообмена, вибрацию элементов активной зоны, трещинообразование в корпусах реакторов, измерять расход и паросодержание теплоносителя и др. [2]. Несмотря на некоторое различие, при решении этих задач есть много общего: единообразие вторичной измерительной аппаратуры и формального аппарата математического обеспечения, требования к первичным преобразователям, связанные со спецификой реакторов. Кроме того, большинство видов шумов связано единым технологическим процессом в реакторе, что обусловливает их взаимную детерминированность или корреляцию.

РЕПОЗИТОРИЙ ГГУ имени Ф. Скорины

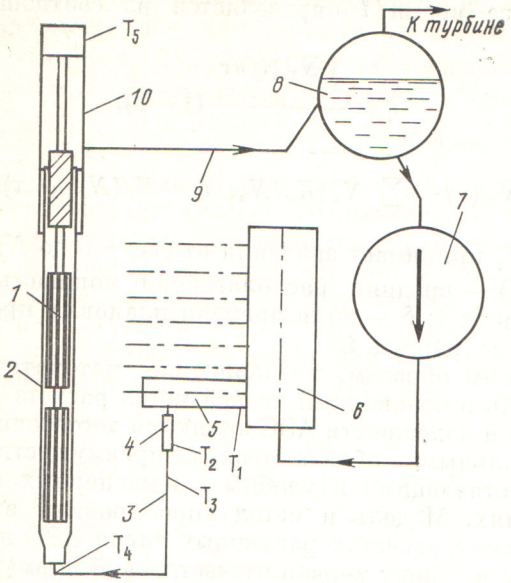


Рис. 1. Схема контура МПЦ: *1* — внутриканальная сборка; *2* — ТК; *3* — водяная коммуникация; *4* — узел расходомер «Шторм» — запорно-регулирующий клапан; *5*, *6* — групповой и напорный коллекторы; *7* — главные циркуляционные насосы; *8* — сепаратор; *9* — пароводяная коммуникация; *10* — верхний тракт ТК; T_1—T_5 — места установки ПП

На наш взгляд, эти различные виды измерений шумов представляется логичным рассматривать как единое научно-техническое направление реакторного контроля — реакторную шумометрию.

В настоящей статье изложены результаты исследований акустических шумов для контроля герметичности контура многократной принудительной циркуляции (МПЦ) серийного реактора РБМК (рис. 1). Контур МПЦ представляет собой разветвленную систему трубных коммуникаций. С точки зрения безопасности эксплуатации реактора такое построение при разгерметизации контура ограничивает размеры развития аварии пределами одной технологической петли. Это обстоятельство допускает при небольших утечках теплоносителя эксплуатацию реактора до планового останова. Поэтому выбор метода контроля герметичности контура основывался на выявлении течи теплоносителя.

Из коммуникаций контура МПЦ особо следует отметить технологические каналы (ТК) как элементы, находящиеся в активной зоне реактора и в наибольшей степени подверженные радиационным, тепловым и механическим воздействиям. С учетом важности контроля герметичности ТК для РБМК была создана и внедрена система, основанная на анализе параметров газовой смеси, омывающей каждый ТК. Однако опыт эксплуатации АЭС показал, что необходимо искать новые методы контроля, учитывая при этом контроль герметичности не только в пределах реактора, но и вне его. Кроме того, для принятия решения о длительности эксплуатации реактора с разгерметизацией важно знать характеристику разгерметизации, в частности скорость ее развития. На базе штатной системы решить эти вопросы не представляется возможным. Предъявляемым требованиям лучше всего соответствует метод, основанный на регистрации и анализе акустических шумов, возникающих при истечении теплоносителя в месте разгерметизации.

Основная причина появления шума при разгерметизации контура — это неоднородность потока, вызванная периодическим его прерыванием, турбулентностью, кавитацией, вихрями в отверстии разгерметизации. Неоднородность образует градиенты скоростей частиц жидкости, вследствие чего возникают местные изменения плотности и давления, которые распространяются в виде акустических волн в окружающую среду и конструкцию.

Для исследования шумовых процессов, возникающих при разгерметизации, создан специальный стенд с натурным ТК и на базе стандартных измерительных средств аппаратурный комплекс с диа-

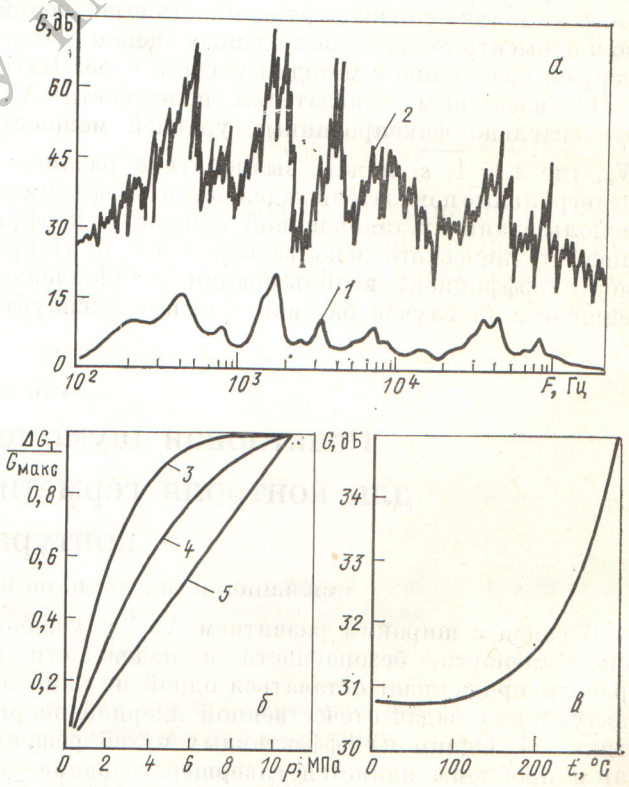


Рис. 2. Зависимость спектральной плотности мощности шума (*а*) и приведенной плотности мощности шума на характерных частотах от давления (*б*) и температуры (*в*) при истечении теплоносителя через отверстие в ТК: *1*, *2* — p = 1 и 7 МПа; *3*—*5* — f = 30, 60 и 100 кГц соответственно

РЕПОЗИТОРИЙ ГГУ имени Ф. Скорины

пазоном частот от 20 Гц до 200 кГц и регулируемой полосой пропускания от 5 Гц до 3 кГц. Стенд позволял имитировать разгерметизацию канала как по характеру и размеру отверстий, так и по месту их расположения при давлении и температуре теплоносителя 0—11 МПа и 20—300 °С. Цель стендовых исследований — определить в указанном диапазоне спектральную плотность мощности шумов (СПМШ), возникающих при разгерметизации, зависимость СПМШ от параметров теплоносителя, характера и размера отверстия, окружающей среды, в которую происходит истечение, а также исследовать распространение шумов по тракту канала.

Как показали опыты, в непосредственной близости от места разгерметизации уровень шумов достигал существенных значений, а широкий спектр (200 Гц — 200 кГц) давал возможность оптимизировать рабочий диапазон, в котором возможен эксплуатационный контроль (рис. 2, *а*). В первую очередь СПМШ обусловлена параметрами теплоносителя. Рост давления в ТК, вызывая увеличение скорости истечения теплоносителя, повышает СПМШ, причем закономерность относительного прироста $\Delta G_т/G_{макс}$ ($G_т$ — текущее значение СПМШ; $G_{макс}$ — максимальное значение СПМШ на той же частоте при $p = 10{,}0$ МПа) имела частотно-зависимый характер и с возрастанием частоты приближалась к линейной (рис. 2, *б*). Увеличение температуры теплоносителя при $p =$ const также вызывало рост СПМШ (рис. 2, *в*). При температуре, близкой к линии насыщения, наблюдался пульсационный характер изменения амплитуды сигнала, вызванный периодическим частичным вскипанием теплоносителя в отверстии. Амплитуда пульсаций достигала 60—80% среднего уровня. Частота повторения всплесков определялась размером отверстия и видом окружающей среды. Длительное истечение теплоносителя с такими параметрами вследствие кавитационных эффектов приводило к размыванию отверстия и росту СПМШ во времени.

В меньшей степени на СПМШ влияют среда, в которую происходит истечение, размеры и характер отверстия разгерметизации. Так, при исследованиях с моделированием истечения теплоносителя в графитовую кладку установлено, что СПМШ уменьшается в среднем на 5 дБ по сравнению с истечением в открытое пространство. Это можно объяснить уменьшением скорости утечки теплоносителя при истечении в графитовую кладку из-за дополнительного гидравлического сопротивления. При увеличении размера отверстия от 0,5 до 5 мм СПМШ повышается в среднем на 10 дБ во всем диапазоне частот. Изменение шероховатости поверхности в отверстии разгерметизации вызывало увеличение турбулентности потока и сказывалось на повышении СПМШ в среднем на 4—6 дБ. Наибольшее увеличение амплитуды полу-

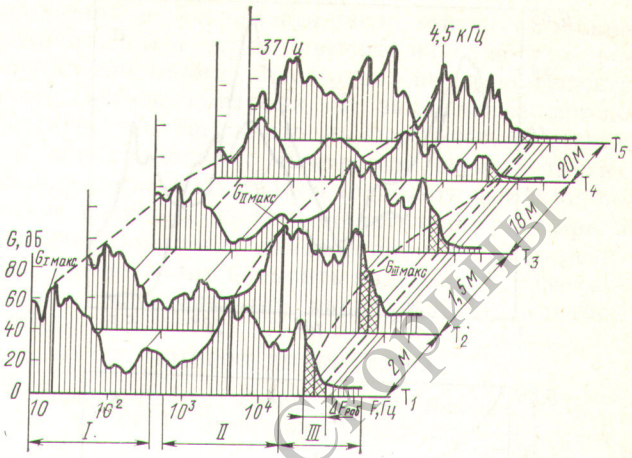


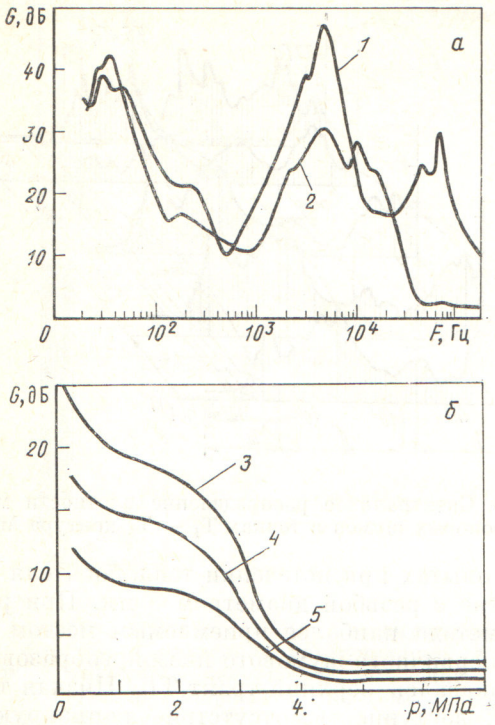
Рис. 3. Спектральное распределение плотности мощности фоновых шумов в точках T_1 — T_5 контура МПЦ

чено в опытах при истечении теплоносителя через отверстие с резьбой диаметром 5 мм. При разработке метода наиболее приемлемым местом установки первичного шумового пьезопреобразователя (ПП) оказался верхний тракт ТК. Низкая температура, доступность, отсутствие ионизирующего излучения дают возможность длительно эксплуатировать ПП, проводить его ревизию и замену. Прохождение шумов к верхнему тракту ТК от наиболее удаленного участка характеризовалось частотно-зависимым ослаблением. Наименьшее ослабление наблюдалось при 30—110 кГц. Этот диапазон частот и был предварительно принят в качестве рабочего.

Таким образом, обнадеживающие результаты стендовых исследований подтвердили целесообразность реакторных экспериментов. Основная задача последних — исследовать фоновые шумы контура МПЦ для сравнения их со стендовыми результатами. Для решения этой задачи в узловых точках по ходу движения теплоносителя (см. рис. 1) были установлены стационарные ПП. Известно, что основным возбудителем фонового акустического шума является движение теплоносителя по контуру циркуляции. Поэтому во всех точках установки ПП в режиме опрессовки контура МПЦ (режим, при котором необходим контроль герметичности и отсутствует движение теплоносителя, $p = 4{,}0 \div 7{,}0$ МПа) в диапазоне от 5 до 200 кГц был зарегистрирован уровень фоновых шумов 5 дБ, что на 30 дБ ниже уровня шумов разгерметизации.

Выявление основных источников фонового шума контура МПЦ и их вклада в фоновые шумы верхнего тракта ТК проводилось в период промывки контура. Это позволило исключить влияние температуры и ионизирующего излучения на показания ПП. Полученные в точках T_1 — T_5 значения энергораспределения шумов (рис. 3) позволили

РЕПОЗИТОРИЙ ГГУ имени Ф. Скорины

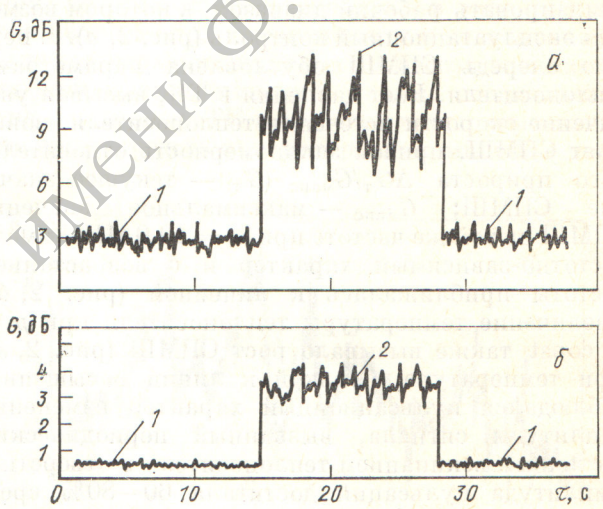


Р и с. 4. Изменение характера спектра фоновых шумов (*а*) при нулевой (*1*) и номинальной (*2*) мощности реактора и зависимость фонового шума на частоте 80 кГц от давления теплоносителя (*б*) при постоянном расходе и нулевой мощности реактора: *3—5* — точки T_2, T_4 и T_5 соответственно

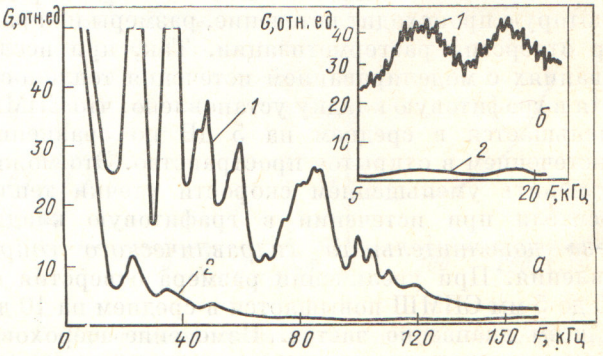
установить основные источники шума: для участка контура напорный коллектор — калач ТК источниками шума низкочастотного диапазона ($G_{I\,макс}$) являются главные циркуляционные насосы; а среднечастотного и высокочастотного диапазонов ($G_{II\,макс}$, $G_{III\,макс}$) — узел запорно-регулирующий клапан — расходомер.

При установке ПП на верхнем тракте ТК основной вклад в рабочем диапазоне частот вносят узел запорно-регулирующий клапан — расходомер «Шторм» и внутриканальная сборка. При многократных выходах реактора на номинальную мощность для всех спектров шумов характерно существенное уменьшение СПМШ в диапазоне 30—200 кГц до уровня ниже уровня шумов разгерметизации (рис. 4, *а*). Предположение о влиянии излучения и температуры на ПП было отвергнуто, так как уменьшение СПМШ регистрировали все ПП, в том числе и на верхнем тракте ТК, где температура составляла 100 °С, а ионизирующее излучение весьма незначительно. Установлено, что СПМШ уменьшается в основном при достижении номинальных параметров теплоносителя. Это явление, видимо, связано с ростом давления в контуре МПЦ, которое подавляет кавитацию и снижает уровень высокочастотных составляющих шума (рис. 4, *б*).

В дальнейшем в массовых измерениях СПМШ при 30—110 кГц и дисперсии сигнала на фиксированной частоте ТК с различными расходами было обнаружено несущественное их различие. Сравнение стендовых и реакторных измерений позволило считать контроль акустическим методом возможным по двум признакам: повышению СПМШ и дисперсии сигнала в диапазоне частот 70—110 кГц по сравнению с окружающими ТК. На действующем реакторе проведены эксперименты со специально организованной течью (рис. 5), подтвердившие эффективность метода. Разгерметизация моделировалась отверстием диаметром 1 мм в нижней части тракта ТК в районе калача. В дальнейшем работоспособность метода



Р и с. 5. Развертки плотности шума ТК с имитацией разгерметизации при работе реактора на номинальной мощности (*а*) и при опрессовке контура МПЦ (*б*) по измерениям в точке T_5 в герметичном (*1*) и разгерметизированном (*2*) ТК



Р и с. 6. Спектры шумов в точке T_5 разгерметизированного (*1*) и герметичного (*2*) ТК при работе реактора на мощности (*а*) и при опрессовке контура МПЦ (*б*)

Репозиторий ГГТУ имени П.О. Сухого

была продемонстрирована в натурных 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., Клемин А. И., 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 × 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 × 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 °С).

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

РЕПОЗИТОРИЙ ГГУ имени Ф. Скорины