

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Nuclear** Energy Development in the 21st Century: Global Scenarios and Regional Trends. Vienna: IAEA, 2010.
2. **Devan K., Bachchan A., Riyas A. e.a.** Physics design of experimental metal fuelled fast reactor cores for full scale demonstration. — Nucl. Engng Design, 2011, v. 241, p. 3058—3067.
3. **Ошканов Н.Н., Сараев О.М., Баканов М.В. и др.** 30-летний опыт эксплуатации быстрого натриевого реактора БН-600. — Атомная энергия, 2010, т. 108, вып. 4, с. 186—191.
4. **Поплавский В.М., Цибуля А.М., Хомяков Ю.С. и др.** Активная зона и топливный цикл для перспективного быстрого натриевого реактора. — Там же, с. 206—211.
5. **Алексеевский Л.Д.** Поиск возможной структуры стационарной системы будущей ядерной энергетики с замкнутым ядерным топливным циклом на основе исследования нуклидных балансов. — Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика ядерных реакторов, 2008, вып. 2, с. 21—26.

Поступило в Редакцию 2.06.11

УДК 621.039.534

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОНТРОЛЯ ГЕРМЕТИЧНОСТИ ПАРОГЕНЕРАТОРОВ ЯЭУ

Змитродан А.А., Раков В.Т., Саранча О.Н., Корнев Ю.К.

(НИТИ им. А.П. Александрова, г. Сосновый Бор, Ленинградская обл.)

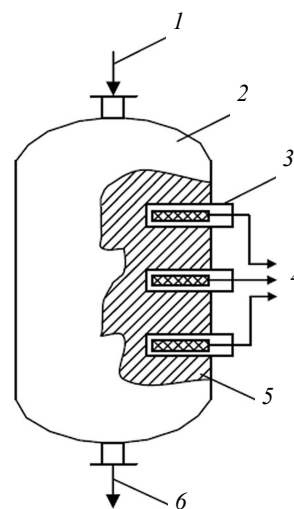
Для оценки реального и назначенного ресурса контурного оборудования ядерных энергетических установок (до профилактического обслуживания или ремонта) необходимы создание систем и разработка методов контроля, позволяющих диагностировать состояние оборудования по параметрам технологических сред [1]. Основными причинами диагностики являются современные требования увеличить заданный ресурс паропроизводящей установки и отдельного оборудования, стремление к сокращению числа плановых ремонтов и переходу к ремонтным работам по фактическому состоянию, а также уменьшение дозовых нагрузок на персонал.

Испытания штатных систем и методов контроля герметичности парогенераторов, таких, как измерение интенсивности γ -излучения трубопроводов острого пара, объемной активности β -излучающих газов на выходе эжекторов и в системе агрегата проб пара, объемной активности ^{16}N в остром паре и активности радионуклидов в конденсате, стендов-прототипов транспортных ЯЭУ позволили их сравнить с методами, разработанными в НИТИ им. А.П. Александрова: радиометрическим и методом регистрации нелетучих радионуклидов в шихте ионообменных фильтров второго контура [2, 3].

Радиометрический метод основан на использовании трития в качестве реперного радионуклида, метод регистрации нелетучих радионуклидов — на определении интенсивности γ -излучения шихты ионообменных фильтров второго контура. Схема размещения блоков детектирования, регистрирующих скорость счета импульсов для последующего определения интенсивности γ -излучения, приведена на рис. 1

Целью испытаний была оценка минимально регистрируемой протечки разными методами. Протечку

имитировали двумя способами, в первом случае путем подачи теплоносителя в конденсатно-питательную систему, а именно в конденсатор основной турбины. Для дозирования последовательно объемом 1, 2, 3 и 8 л импульсно в течение 1—3 мин использовали теплоноситель, пробы которого предварительно отбирали из первого контура. Во втором случае протечку моделировали путем непрерывной подачи теплоносителя в течение 10—30 мин через дозирующие устройства в пар и воду второго контура за счет разности давления в них. Испытания проводили поэтапно с изменением расхода через дозирующее устройство от 0,4 до 28 кг/ч при мощности реактора от 20 до 100% $N_{\text{ном}}$.



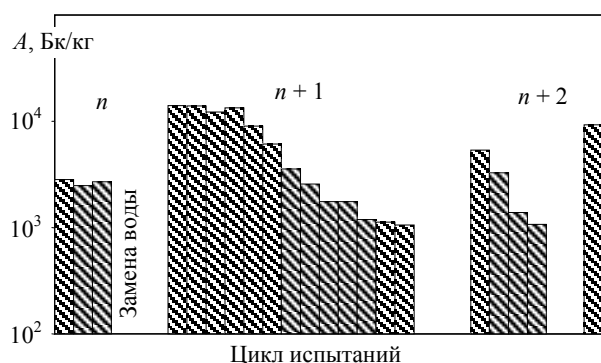
Р и с. 1. Размещение блоков детектирования в ионообменных фильтрах: 1 — вход конденсата; 2 — ионообменный фильтр; 3 — гильза; 4 — блоки детектирования, размещенные в гильзах; 5 — смешанная шихта; 6 — выход конденсата

По результатам испытаний было установлено, что штатные и экспериментальные методы достоверно регистрировали протечку. Наиболее чувствительным оказался метод, основанный на регистрации нелетучих радионуклидов в шихте ионообменных фильтров. Нижний предел обнаружения протечки с его помощью составлял 0,05 кг/ч с учетом активности теплоносителя [4].

При эксплуатации стенда-прототипа ЯЭУ в конце одного из заключительных циклов работы в воде второго контура впервые после имитации протечки теплоносителя было зафиксировано наличие трития активностью, в 3 раза превышающей минимально регистрируемую. Наряду с этим блоками детектирования было зарегистрировано увеличение скорости счета импульсов в 1,5 раза.

После окончания цикла вода из конденсатно-питательной системы была полностью дренирована по технологической необходимости. Перед началом последующего цикла конденсатно-питательную систему заполнили водой высокой чистоты, активность трития в ней была меньше минимально регистрируемой. За содержанием трития в воде второго контура и показаниями блоков детектирования, расположенных в гильзах на различной высоте ионообменных фильтров, наблюдали на стационарных и переходных режимах работы паропроизводящей установки, а также после ее ввода и вывода из действия, включая стояночный режим. С момента обнаружения протечки показания скорости счета блоков детектирования в одном из ионообменных фильтров увеличились в 1,5 раза, в двух других в 2,5 раза, что указывало на поступление в шихту γ -излучающих радионуклидов.

Изменения активности трития носили следующий характер: после выхода паропроизводящей установки в турбогенераторный режим и подключения парогенераторов к конденсатно-питательной системе в воде второго контура фиксировали наличие трития, в 3—19 раз превышающее минимально регистрируемый уровень, затем при эксплуатации наблюдали тенденцию к постепенному снижению активности до минимально регистрируемой (рис. 2).



Р и с. 2. Изменение активности трития в воде второго контура в заключительных циклах испытаний стенда-прототипа ЯЭУ

Теплоноситель в среду второго контура согласно законам термодинамики поступает в виде парогазовой среды [5]. Повышение активности трития можно связать с импульсной протечкой теплоносителя при кратковременном нарушении герметичности парогенераторов вследствие резкого изменения температуры трубной системы в начальные моменты выхода паропроизводящей установки в турбогенераторный режим, снижение — с разбавлением при восполнении невозвратных потерь воды второго контура в процессе эксплуатации ЯЭУ.

Отметим, что протечка была зафиксирована, когда активная зона паропроизводящей установки выработала 100% своего энергоресурса. Дальнейшая эксплуатация осуществлялась в щадящем режиме на пониженной мощности, что предотвращало появление и развитие дефекта.

Накопление трития в воде второго контура при постоянстве технологических параметров (масса воды во втором контуре и скорость неорганизованных протечек воды) можно описать дифференциальным уравнением

$$\frac{dA_2}{dt} = G_2'' A_1 - W_{\text{пр}}'' A_2, \quad (1)$$

где A_1 , A_2 — удельная активность трития в теплоносителе первого и воде второго контура соответственно, Бк/кг; $G_2'' = G_2/M_2$; G_2 — скорость протечки теплоносителя первого контура во второй, кг/ч; M_2 — масса воды во втором контуре, кг; $W_{\text{пр}}'' = W_{\text{пр}}/M_2$; $W_{\text{пр}}$ — скорость неорганизованных протечек воды второго контура, кг/ч; $W_{\text{пр}} = W_{\text{под}}$; $W_{\text{под}}$ — скорость подпитки второго контура, кг/ч.

В стационарном случае ($W_{\text{пр}} = W_{\text{под}} = 0$) после преобразования дифференциального уравнения (1) получим выражение для расчета суммарной протечки теплоносителя во второй контур $g = A_2 M_2 / A_1$.

По результатам измерения удельной активности трития в теплоносителе и воде второго контура была рассчитана суммарная протечка теплоносителя (см. таблицу).

Согласно результатам с момента регистрации трития в воде второго контура и по окончании кампании при установленных кратковременных протечках во второй контур поступило ~2 кг теплоносителя.

Необходимо добавить, что в силу объективных причин не во все моменты выхода паропроизводящей установки на мощность удалось измерить содержание трития в воде второго контура, как и после гидравлических испытаний реактора в межцикловой период, которые, вероятно, также способствовали дополнительному поступлению теплоносителя во второй контур. На основании этого можно предположить, что фактическая масса теплоносителя, попавшего во второй контур, превышала установленную суммарную

Суммарная протечка теплоносителя во второй контур, рассчитанная по удельной активности трития в теплоносителе и воде второго контура

Цикл	Активность трития, Бк/кг		Суммарная протечка, кг	Примечания
	в теплоносителе первого контура	в воде второго контура		
n	$4,1 \cdot 10^8$	$2,6 \cdot 10^3$	0,12	
$n + 1$	$2,4 \cdot 10^8$	$1,4 \cdot 10^4$	1,05	Турбогенераторный режим. Ввод в работу реактора (0 → 20%)
$n + 2$	$3,1 \cdot 10^8$	$5,4 \cdot 10^3$	0,33	Турбогенераторный режим. Ввод в работу реактора (0 → 30%)
	$2,5 \cdot 10^8$	$9,3 \cdot 10^3$	0,66	Турбогенераторный режим. Ввод в работу реактора (0 → 20%)

протечку. Это предположение было подтверждено анализом проб шихты из ионообменных фильтров второго контура после окончания кампании, в которых зафиксировали ^{137}Cs и ^{134}Cs . Согласно расчетам суммарная масса теплоносителя, поступившего во второй контур за период загрузки ионообменных фильтров, составляла ~20 кг.

Таким образом, можно сделать вывод, что разработанные методы, обладая такими возможностями, как высокая чувствительность обнаружения протечки (0,05 кг/ч), количественная, а не качественная оценка суммарной протечки, независимость радиометрического метода от режимов эксплуатации паропроизводящей установки, позволяют расширить информативность и обеспечить надежность контроля межконтурной герметичности для диагностики и мониторинга состояния контурного оборудования. Использование предложенных методов в совокупности с штатными дает возможность создать измерительно-информационную систему непрерывного и дискретного контроля герметичности парогенераторов транспортных ЯЭУ в целях его совершенствования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Холупкова Г.И. Технологический радиационный контроль. — В кн.: Машиностроение. Энциклопедия. М.: Машиностроение. Машиностроение ядерной техники, 2005, т. IV, кн. 2, с. 136—142.
2. Бредихин В.Я., Раков В.Т., Змитродан А.А. Способ контроля межконтурной герметичности судовой ядерной энергетической установки с водным теплоносителем. Патент РФ № 2203510. — Бюл. «Изобретения. Полезные модели», 2003, № 12, с. 234.
3. Бредихин В.Я., Раков В.Т. Способ контроля герметичности парогенератора ядерной энергетической установки. Патент РФ № 2191437. — Там же, 2002, № 29, с. 417.
4. Раков В.Т. Совершенствование контроля герметичности парогенераторов судовых ядерных энергетических установок. — Ядерные измерительно-информационные технологии, 2005, № 1(13), с. 17—20.
5. Делайе Дж., Гио М., Ритмюллер М. Теплообмен и гидродинамика двухфазных потоков в атомной и тепловой энергетике. Пер. с англ. М.: Энергоатомиздат, 1984.

Поступило в Редакцию 22.07.11

УДК 621.039.534

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МАССОПЕРЕНОСА ПРИМЕСЕЙ В ХОЛОДНЫХ ЛОВУШКАХ БЫСТРЫХ РЕАКТОРОВ

*Кумаев В.Я., Алексеев В.В., Козлов Ф.А., Пирогов Э.П.
(ГНЦ РФ — ФЭИ им. А.И. Лейпунского, г. Обнинск)*

Математическая модель процессов в холодной ловушке. Для описания очистки натрия использована система уравнений многокомпонентной среды, включающая в себя уравнения гидродинамики, сохранения и переноса тепловой энергии, физико-химической кинетики примесей, сохранения и кон-

вективно-диффузионного переноса компонентов примеси [1—3]. В уравнениях переноса компонентов примеси с учетом расслоения учитываются диффузионные процессы. Уравнение для определения концентрации примеси в двумерной цилиндрической области имеет вид