

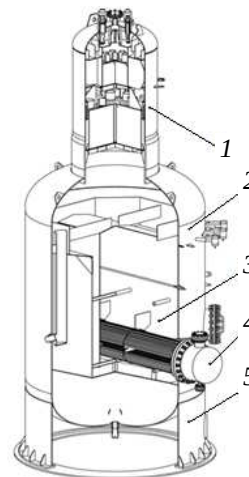
УДК 621.039.6.05

УЛУЧШЕНИЕ ТЕПЛОГИДРАВЛИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ДЕАЭРАТОРОВ СИСТЕМЫ ПОДПИТКИ И БОРНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ С НАСАДОЧНЫМИ КОЛОННАМИ

*Литвиненко Л.Д., Безлепкин В.В., Митрюхин А.Г., Амелюшина А.Г.
(АО «Атомпроект», г. Санкт-Петербург)*

Одной из важных систем, обеспечивающих надежную работу первого контура АЭС, является система подпитки и борного регулирования, предназначенная для поддержания материального баланса теплоносителя во всех эксплуатационных режимах: управления реактивностью реактора путем изменения концентрации борной кислоты в теплоносителе, регулирования водно-химического режима, дегазации теплоносителя и др. В состав основного технического оборудования системы подпитки и борного регулирования входит деаэратор, предназначенный для дегазации выводимого из первого контура теплоносителя [1]. В процессе дегазации удаляются растворенные в теплоносителе водород, кислород и радиоактивные благородные газы ксенон, криптон и др. Согласно назначению деаэратор должен работать в 10 режимах разной продолжительности и периодичности. В этих режимах теплоноситель поступает в деаэратор одновременно из разных источников с расходом, изменяющимся от 5 до 75 т/ч, и температурой от 20 °С и выше. В зависимости от режима он имеет разную концентрацию газов.

Деаэратор подпитки и борного регулирования представляет собой цилиндрический аппарат, который состоит из бака-аккумулятора и деаэрационной колонки внутренним диаметром 1400 мм, установленной на верхнем днище бака-аккумулятора (рис. 1). Внутри колонки установлены малая и большая насадочные колонны, главная и периферийная распределительные камеры, центральная и кольцевая струйные камеры. Малая насадочная колонна расположена в верхней части деаэрационной колонки. Над малой насадочной колонной располагается распределительная тарелка с патрубками для пропуска пара и отверстиями для равномерного распределения воды. Система вертикальных кольцевых и горизонтальных перегородок с отверстиями образует главную и периферийную распределительные камеры, центральную и кольцевую струйные камеры. Это устройство обеспечивает распределение поступающей воды



Р и с. 1. Деаэратор подпитки и борного регулирования: 1 — деаэрационная колонка; 2 — бак-аккумулятор; 3 — корпус теплообменника; 4 — теплообменник; 5 — опора

на большую и малую насадки в разных режимах работы деаэратора.

Большая насадочная колонна размещается в нижней части деаэрационной колонки под кольцевой струйной камерой и малой насадочной колонной. Над ней установлена провальная распределительная тарелка с отверстиями для равномерного распределения воды. Насадочные колонны представляют собой трубу с опорной решеткой, которая навалом засыпается кольцами из коррозионно-стойкой стали наружным диаметром, равным их высоте (кольцами Рашига) [2]. Бак-аккумулятор представляет собой вертикальный цилиндр внутренним диаметром 3000 мм. В его нижней части расположен горизонтальный теплообменник, состоящий из пучка U-образных труб. В верхней части корпуса теплообменника имеется емкость для приема воды из деаэрационной колонки в виде корыччатой воронки, образованной вертикальными и наклонными перегородками.

Таким образом, подлежащая дегазации вода (теплоноситель первого контура) через патрубок, расположенный в крышке деаэрационной колонки, поступает в главную распределительную камеру и затем на малую насадочную колонну. Если расход поступающей воды больше 9 т/ч, то включается в работу периферийная

распределительная камера и работают две насадочные колонны. Парогазовая смесь выводится из деаэратора через центральный патрубок на верхнем днище деаэрационной колонки, дегазированная вода отводится из нижней части бака-аккумулятора.

Опыт эксплуатации систем сжигания водорода, подпитки и борного регулирования первого контура на АЭС выявил негативный эффект при комплексной работе этих систем в режиме с деаэрацией теплоносителя первого контура. В трубопроводы системы сжигания водорода поступает вода из деаэратора в режиме продувки первого контура, и, как следствие, происходит долговременное блокирование выхода неконденсируемых газов.

Есть основания полагать, что конструкция деаэраторов подпитки и борного регулирования не обеспечивает необходимые запасы до захлебывания. Гидродинамическое явление «захлебывание» ограничивает поступление жидкости в деаэратор при определенном расходе пара, выходящего из него. Вследствие этого нарушается баланс входящего теплоносителя и выходящего потока пара. Эмпирических соотношений, описывающих зависимость приведенных скоростей жидкости и пара (кривую захлебывания), много. Их значительная часть подобна приведенной [3] и имеет вид

$$\sqrt{j_g^*} + m = \sqrt{j_f^*} = C,$$

где $j_p^* = j_p \sqrt{\rho_p} / \sqrt{\Delta \rho g D}$ — безразмерная приведенная скорость фаз; j_p , ρ_p — скорость и плотность фаз соответственно; $\Delta \rho = \rho_f - \rho_g$; g — ускорение свободного падения; D — диаметр трубы; индекс $p = f, g$ — жидкая и газовая фаза соответственно; m , C — безразмерные численные коэффициенты, зависящие от числа Архимеда (т.е. от соотношения сил тяжести и вязкости) и условий в точке входа жидкости в канал.

Захлебывание может быть причиной неудовлетворительной работы деаэраторов подпитки и борного регулирования. В определенных режимах возможно скопление большого количества водорода в деаэраторах.

Причины неустойчивой работы деаэратора были проанализированы с помощью разных методик. Методики руководящего технического материала [4] не позволяют напрямую рассчи-

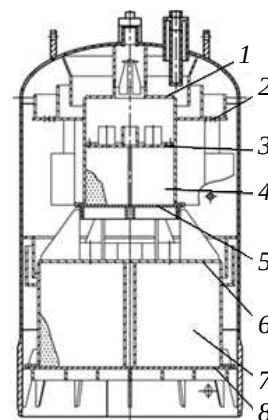
тать деаэратор с кольцами Рашига. Расчеты по методикам [4] с приведенными характеристиками и приближенным [5, 6] показали, что критерии устойчивости (захлебывания) деаэратора не выполняются на малой насадочной колонне. С помощью теплогидравлического расчетного кода КОРСАР/ВЗ [7] выполнен гидродинамический анализ работы деаэратора имеющейся конструкции. При построении нодализационной схемы были приняты допущения:

из-за отсутствия в библиотеке расчетного кода КОРСАР элемента типа насадки как малой, так и большой насадочная колонна с кольцами Рашига моделируется трубой эквивалентного диаметра с соответствующими смоченным периметром, проходным сечением и длиной, равной высоте слоя насадки;

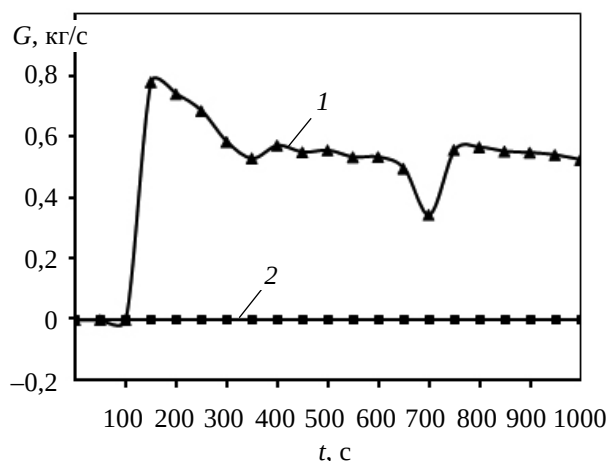
для упрощения модели и ускорения расчетов была создана модель только деаэрационной колонки, бак-аккумулятор не моделировался.

На рис. 2 показаны внутрикорпусные устройства деаэрационной колонны. Кольцевые каналы моделируются с помощью элемента канал СН, дырчатые листы — местное сопротивление LR, соединения каналов в общий объем — коллектор COL, граничные условия — заданная граничная ячейка BVOL_T, стенка канала — непроницаемое соединение BLJUN, расход продувочной воды первого контура — заданный источник массой SMASS_T, задвижка — задвижка VAL.

Расчеты показали, что при штатной работе в режиме с увеличением расхода продувочной воды первого контура, поступающей в деаэратор, через трубопровод отвода, расположенный



Р и с. 2. Деаэрационная колонна деаэратора подпитки и борного регулирования: 1, 2, 3, 5, 6, 8 — дырчатые листы; 4, 7 — малая и большая насадочная колонна соответственно



Р и с. 3. Зависимость расхода воды (1) и пара (2) от времени в выходном патрубке деаэратора подпитки и борного регулирования

в верхней части головки деаэратора, в деаэратор вместо парогазовой смеси начинает поступать борированная вода первого контура. Впоследствии вода поступает в систему сжигания водорода, что может привести к выходу из строя компрессоров (рис. 3).

Таким образом, моделирование средствами кода КОРСАР/ВЗ подтверждает расчеты с помощью методик [4]. Почти во всех режимах работы с расходом поступающей среды больше 5 т/ч возможно захлебывание на малой насадке, которое приводит к забросу воды в трубопроводы системы сжигания водорода.

Как показывает анализ, надежных методик и программных средств расчета гидродинамических процессов деаэраторов с неупорядоченными насадками из колец Рашига в настоящее время нет.

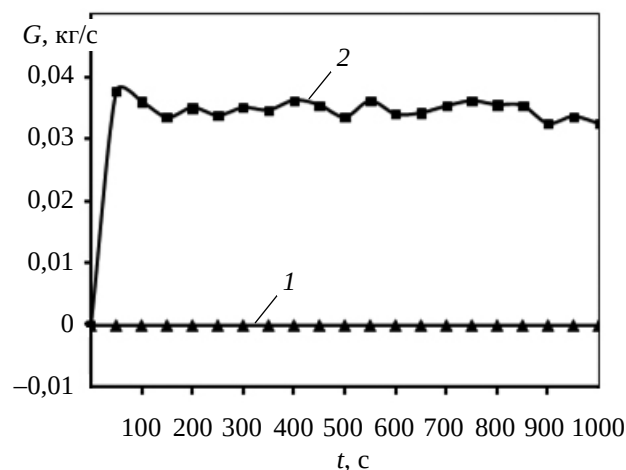
Анализ эксплуатации и расчеты позволяют предложить следующие пути решения проблемы:

- увеличить диаметр насадок первой ступени деаэрации в целях обеспечения запаса до захлебывания во всем диапазоне расхода и температуры воды;

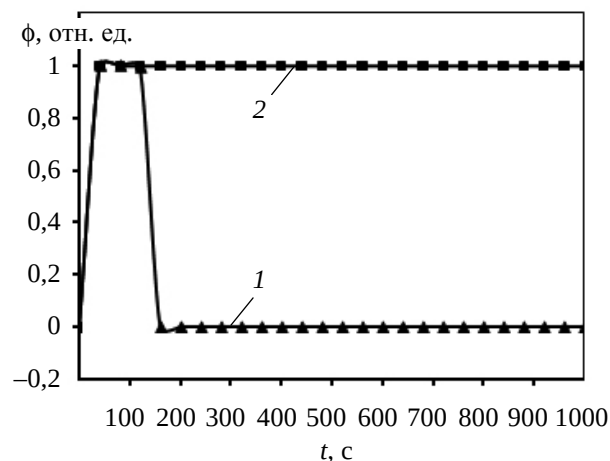
- перейти на другой тип элементов неупорядоченных насадок, например, на омегаобразные, которые можно рассчитать по методикам [4];

- разделить расход парогазовой смеси: 30 кг/ч — через напорную тарелку малой насадки, 100 кг/ч — из объема большой насадки.

По предложенной методике был рассчитан деаэратор с дополнительным патрубком для сдувки, который включается в работу при расходе поступающей воды более 5 т/ч. Патрубок



Р и с. 4. Зависимость расхода воды (1) и пара (2) от времени в деаэраторе подпитки и борного регулирования с дополнительной конструкцией



Р и с. 5. Зависимость объемного паросодержания от времени имеющегося деаэратора (1) и деаэратора с дополнительной конструкцией (2)

расположен в крышке деаэратора, что обеспечивает разнесение сдувки на два потока: 30 кг/ч из струйной камеры малой насадочной колонны и оставшиеся 100 кг/ч из струйной камеры большой насадочной колонны. Данное решение позволяет избежать захлебывания в выходном патрубке и обеспечить суммарный расход парогазовой смеси по двум патрубкам с постоянным расходом 130 кг/ч, который поступает в линию сдувки системы сжигания водорода (рис. 4, 5).

Принятые решения должны быть обоснованы и подтверждены экспериментальными исследованиями в условиях, максимально приближенных к натурным.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Деаэратор** подпитки и борного регулирования. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. ОАО «Сибэнергомаш», 2001.

2. Кафаров В.В. Основы массопередачи. Учебник для студентов вузов. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Высшая школа, 1979.
3. Уоллис Г. Одномерные двухфазные течения. М.: Мир, 1972.
4. Пермяков В.А., Гиммельберг А.С., Виханский Г.М., Шубников Ю.М. Расчет и проектирование термических деаэраторов. РТМ 108.030.21-78, 1979.

5. Оликер И.И., Пермяков В.А. Термическая деаэрация воды на тепловых электростанциях. Л.: Энергия, 1971.
6. Хоблер Т. Массопередача и абсорбция. Пер. с польск. под ред. П.Г. Романкова. Л.: Химия, 1964.
7. КОРСАР/ВЗ. Руководство пользователя. НИТИ им. А.П. Александрова. Сосновый Бор, 2007.

Поступила в Редакцию 6.11.14

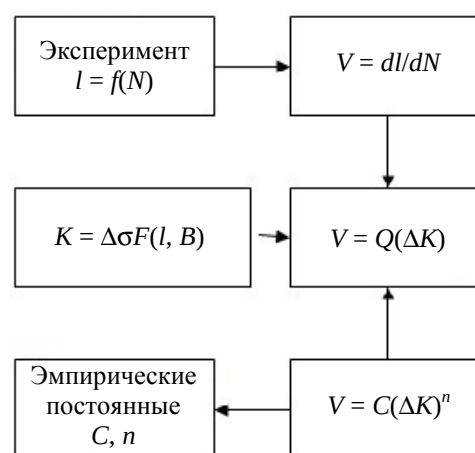
УДК 620.178.311

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ ИСПЫТАНИЯ МАТЕРИАЛОВ НА УСТАЛОСТНУЮ ТРЕЩИНОСТОЙКОСТЬ

Гольцев В.Ю., Маркочев В.М. (НИЯУ МИФИ, г. Москва)

Проекты новых АЭС предусматривают срок эксплуатации 60 лет и более. При таком сроке существенное влияние на прочность приобретает среда, с которой контактирует материал трубопроводов и иного оборудования [1, 2]. Широко используемые для исследований влияния среды компактные образцы не полностью удовлетворяют требованиям, поскольку с их помощью оценивается только мгновенная скорость усталостного или длительного статического разрушения [3]. Возникает необходимость в целенаправленных методиках испытания, при которых распространение трещины не влияет на силовой параметр, контролирующий процесс разрушения, — коэффициент интенсивности напряжений. Целями настоящей статьи являются анализ подходов, обеспечивающих экспериментальное получение надежной зависимости скорости роста трещины от размаха коэффициента интенсивности напряжений при использовании для этой цели двухбалочных образцов, и оценка их возможностей для исследования влияния среды при независимости коэффициента интенсивности напряжений от размера усталостной трещины.

Стандартная методика построения диаграммы усталостной трещиностойкости. Стандартная методика испытаний на усталостную трещиностойкость базируется на гипотезе существования инвариантной диаграммы усталостного разрушения — зависимости скорости роста трещины V от размаха коэффициента интенсивности напряжений ΔK . Этой гипотезе отвечает обработка результатов испытания, показанная на рис. 1 [3].



Р и с. 1. Метод построения экспериментальной зависимости скорости роста усталостной трещины от размаха коэффициента интенсивности напряжений

Важным фактором является принятая аппроксимация диаграммы усталостного разрушения степенной функцией

$$V = dl/dN = C(\Delta K)^n, \quad (1)$$

где l — длина усталостной трещины; N — текущее число циклов нагружения; C, n — эмпирические параметры, характеризующие сопротивление усталостному разрушению конструкционного материала при заданных условиях испытаний.

Экспериментальную зависимость $V = Q(\Delta K)$ получают дифференцированием экспериментальной кривой роста усталостной трещины

$$l = f(N) \quad (2)$$

для задаваемого размаха нагрузки ΔP или некоторого условного напряжения $\Delta \sigma$, которые под-