

В целом можно утверждать, что в большинстве рассмотренных примеров учет пространственных эффектов с помощью поправочного коэффициента (7) приводит к значительному сокращению расчетно-экспериментальных отклонений. Отсутствие полного совпадения, вероятно, можно объяснить погрешностями как самих измерений, так и расчетной модели. Следует отметить, что при измерении большой отрицательной реактивности для оценки поправочного коэффициента $f(r_k, t)$ допустимо использование только стационарных расчетов. При этом должна решаться неоднородная задача с распределенным источником запаздывающих нейтронов.

Авторы признательны В.Г. Дементьеву, М.П. Лизоркину, А.Н. Новикову, А.Н. Камышану и Д.Л. Шишкову за полезные обсуждения проблемы, рассмотренной в этой статье, Ю.А. Крайнову за предоставленные экспериментальные данные, а также основным разработчикам кода NOSTRA К.Д. Никитину, А.А. Пинегину и Б.Е. Шумскому.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шихов С.Б., Троянский В.Б. Теория ядерных реакторов. Т. 2. Газокинетическая теория. М.: Энергоатомиздат, 1983.
2. Нечепуренко Ю.М., Шишков Л.К. Об определении реактивности на основе обобщенного уравнения точечной кинетики. — Журнал выч. мат. и мат. физики, 2002, т. 42, № 9, с. 1394—1398.
3. Krell J. Analysis of rod drop measurements at VVER-440 reactor. — In: Proc. of Annual Meeting on Nuclear Technology. Koln, Germany, 24—27 May 1993.
4. Казанский Ю.А., Матусевич Е.С. Экспериментальные методы физики реакторов. М.: Энергоатомиздат, 1984.
5. Siltanen P., Ionov V.S., Shishkov L.K. e.a. Reactivity evaluation, high subcriticality. — In: Proc. of the Ninth Symp. of AER. Demanovska Dolina, Slovakia, 1999, p. 413—499.
6. Терешенок В.А., Поваров В.П. Влияние положения ионизационных камер относительно отдельных органов регулирования ВВЭР-1000 на показания измерителей реактивности. — Теплоэнергетика, 2003, № 5, с. 22—25.
7. Nikitin K.L., Pinegin A.A., Shumski B.E. Verification of the three-dimensional dynamic code NOSTRA. Problems of nuclear power installation safety. These of Papers Presented to the IX Seminar on Reactor Physics Problems. M., MEPhI, 1995, p. 136—154.

Поступила в Редакцию 10.11.03

УДК 621.039:620.193/197

СНИЖЕНИЕ ПРОДУКТОВ КОРРОЗИИ В ВОДНОМ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕ — ОСНОВНОЙ ПУТЬ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ И УЛУЧШЕНИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ЯЭУ

Прозоров В.В. (Сосновоборский гос. проектно-изыскательский ин-т ВНИПИЭТ)

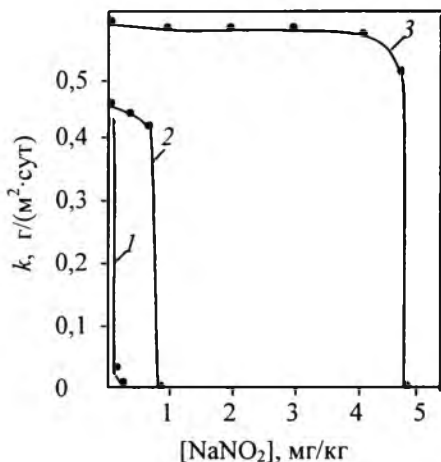
Хранение и переработка радиоактивных отходов имеют большое экономическое и социальное значение и влияют на реализацию ядерной энергетической программы в целом. Поэтому разработки в области дезактивации направлены на повышение ее эффективности и сокращение объемов образующихся отходов [1]. Однако дезактивирующая обработка для улучшения радиационной обстановки в большинстве случаев является следствием неправильно организованных мероприя-

тий по предотвращению образования продуктов коррозии в различные периоды эксплуатации ядерной установки. Основными источниками радиоактивного загрязнения оборудования АЭС являются продукты коррозии, циркулирующие с теплоносителем по контуру и активирующиеся в нейтронном потоке.

На АЭС с РБМК поступающие в реакторную воду продукты коррозии в основном образуются за счет коррозии конструкционных материалов КМПЦ и еще в большей степени конденсатно-питательного тракта. Питательная вода, без очистки поступающая в КМПЦ, содержит продукты коррозии, которые образуются в результате взаимодействия водного теплоносителя с поверхностью из углеродистой стали, имеющей низкую коррозионную стойкость особенно в стояночных режимах. Углеродистой стали в конденсатно-питательном тракте более 5000 м².

За один эффективный год работы в контур многократной принудительной циркуляции поступает до 150 кг продуктов коррозии (в пересчете на железо) [2]. Откадываемые за пределами активной зоны радиоактивные продукты коррозии создают источники γ -излучения. Активность оборудования, находящегося вне зоны реактора, на 90—98% определяется коррозионными отложениями. Таким образом, для улучшения радиационной обстановки необходимо снижать поступление продуктов коррозии в водный теплоноситель и в первую очередь в стояночных и переходных режимах, самых неблагоприятных с коррозионной точки зрения для стали перлитного класса. При снижении выноса железа в 2 раза коллективная доза облучения персонала при ремонте может снизиться в 3 раза [2]. В то же время при правильном ведении водно-химических режимов коррозионную стойкость перлитной стали, например, на АЭС с РБМК можно повысить в сотни и тысячи раз без всяких затрат.

Предварительное оксидирование стали снижает защитную концентрацию анодных ингибиторов и расширяет до 300 °С температурный диапазон, в котором ингибиторы проявляют защитные свойства. Наилучшие защитные свойства по отношению к оксидированной стали проявляют растворимые гидроксиды и нитриты. Концентрация ингибиторов зависит от способа оксидирования, температуры, качества и скорости потока обессоленной воды и продолжительности выдержки стали в ингибирующем растворе [3]. Снижение концентрации ингибитора по сравнению с обычно применяемой может достичь 10⁵ [4]. В этом случае коррозия в обессоленной воде может подавляться и без добавок ингибитора, поскольку вследствие диссоциации молекул воды будет содержаться достаточное количество ОН⁻. Например, становится понятным механизм аномально высокой защитной способности нейтрально-кислородного водного режима. Он является частным случаем системы оксидированная сталь—ингибитор, когда оксидная пленка определенного состава и толщины образуется за счет окисления стали водой при температуре около 300 °С, избыточное количество гидроксил-ионов образуется на катодных участках поверхности по реакции $2\text{H}_2\text{O} + \text{O}_2 + 4e \rightarrow 4\text{OH}^-$. Механизм в обоих случаях один и тот же — при сорбции ингибитора на поверхности магнетитовых кристаллов внутри пор образуются диполи, создающие электрическое поле. Чем меньше диаметр поры, тем при меньшей концентрации ингибитора создается электрическое поле, предотвращающее выход ионов железа по порам из металла в воду, так как напряженность поля изменяется обратно пропорционально квадрату расстояния от то-



Р и с. 1. Влияние концентрации нитрита натрия на скорость коррозии стали 20, оксидированной разными способами, в обессоленной воде при 20 °С за 100 сут

обессоленную область. Минимальная концентрация нитрита натрия и кислорода, при которых почти полностью подавляется коррозия, приведена в табл. 1.

Т а б л и ц а 1. Коррозионные характеристики образцов стали 20, оксидированных различными способами

Способ оксидирования	Защитная концентрация		Объемная пористость, %
	NaNO ₂ , мг/кг	O ₂ при 80 °С ($v = 2\text{—}3$ м/с), мкг/кг	
1	0,1±0,05	30±10	1,1±0,1
2	0,8±0,1	70±20	2,4±0,3
3	4,8±0,5	150±40	5,1±0,9

Пористость оксидного покрытия измеряли радиометрически по заполнению пор специальными радиоактивными растворами, измерением остаточной радиоактивности с последующим пересчетом, концентрацию кислорода — с помощью индикатора метиленового голубого или иодометрическим способом.

Эксперименты на стенде «Гидродинамическая петля» обосновали возможность расширения функциональных возможностей нейтрально-кислородного водного режима для обеспечения эффективной защиты энергетического оборудования в следующих случаях: в начальный период эксплуатации, при снижении температуры водного теплоносителя, ухудшении качества теплоносителя, снижении нижнего концентрационного предела кислорода в водном теплоносителе. Необходимым условием для этого является также предварительное оксидирование внутренних поверхностей оборудования.

В табл. 2 приведены результаты коррозионных испытаний стали марки 20 при температуре 80±3 °С. Сталь была предварительно оксидирована в растворе 75 мг/кг азотной кислоты в течение 3 ч при 95 °С. Испытания проводили в растворе NaNO₂ 1 мг/кг с последующей выдержкой в обессоленной воде с содержанием кислорода 300—500 мкг/кг.

чечного заряда диполя. На рис. 1 приведена зависимость скорости коррозии стали 20, оксидированной тремя способами, от концентрации нитрита натрия: 1 — в растворе 75 мг/кг HNO₂ (пропускали раствор NaNO₂ через катионитовый фильтр в H⁺-форме); 2 — в растворе 75 мг/кг HNO₃ (в обоих случаях при 95±3 °С в течение 3 ч); 3 — в растворе 5 г/кг NH₄NO₃ (95±3 °С, 0,5 ч).

При добавке в воду как анодных ингибиторов, так и кислорода стационарный потенциал стали смещается в положительную сторону, и чем ниже пористость покрытий и количество в растворе активирующих ионов, тем при меньшей концентрации кислорода или ингибитора потенциал смещается в пассивную область.

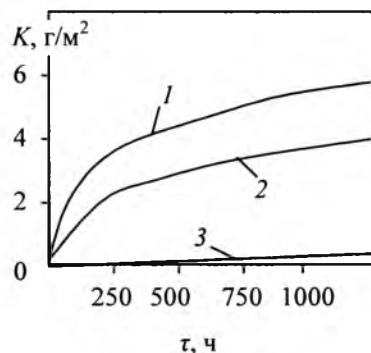
Т а б л и ц а 2. Скорость коррозии образцов стали 20 в потоке обессоленной воды с добавками нитрита натрия или кислорода при 80 °С и параметры водно-химического режима

Параметр	Время испытаний, ч				
	0	24	72	120	240
Нитритный режим					
Скорость коррозии оксидированных образцов, г/(м ² ·сут)					≤0,01
Содержание железа в растворе, мкг/кг	90	30	15	≤10	≤10
Содержание хлорид-ионов, мкг/кг	30	50	80	90	120
Концентрация NaNO ₂ , мг/кг	1,12	1,06	0,91	0,85	0,78
Кислородный режим					
Скорость коррозии образцов, г/(м ² ·сут): оксидированных					≤0,01
неоксидированных					0,08
Содержание железа в растворе, мкг/кг	80	70	50	40	40
Содержание хлорид-ионов, мкг/кг	50	60	80	90	110
Электропроводность, мкСм/см	0,2	0,3	0,5	0,6	0,7
[O ₂], мкг/кг	500	450	350	450	450

Коррозия оксидированной стали в растворе нитрита натрия 1 мг/кг была подавлена ($\leq 0,01$ г/(м²·сут)), содержание железа в растворе снизилось до <10 мкг/кг, хотя хлорид-ионов повысилось с 30 до 120 мкг/кг (ионообменные фильтры были отключены, стенд имел застойные зоны). Коррозия оксидированной стали в потоке кислородсодержащей воды при 80 °С была также подавлена ($\leq 0,01$ г/(м²·сут)), несмотря на неоптимальные условия для реализации нейтрально-кислородного водного режима (относительно высокая электропроводность воды, низкая температура). Неоксидированная сталь в этих условиях корродирует со скоростью 0,08 г/(м²·сут).

На рис. 2 приведены результаты стендовых испытаний коррозионной стойкости углеродистой стали 20 и нержавеющей 08X18H10T в обессоленной воде ($\kappa = 0,1\text{—}0,3$ мкСм/см) при 285 °С. Видно, что при концентрации кислорода в воде 0,2—0,5 мг/кг и скорости потока 3—8 м/с скорость коррозии углеродистой стали после выдержки в течение 250—500 ч приближается к скорости коррозии нержавеющей стали, однако в начальный период она ее значительно превосходит. В отличие от неоксидированной стали (20, 08X18H10T) коррозия оксидированных образцов стали 20 подавляется уже в первые часы выдержки, что важно с практической точки зрения.

Окисдирующие растворы [5, 6] имеют концентрацию химических реагентов менее 80 мг/кг и



Р и с. 2. Зависимость суммарной коррозии неоксидированной стали марки 20 (1), 08X18H10T (2), оксидированной стали 20 (3) в воде при скорости потока 3 м/с, pH 6—7, концентрация кислорода 0,2—0,5 мг/кг, 285 °С от времени испытаний

легко выводятся из контура с помощью штатных ионообменных фильтров или быстро распадаются на нетоксичные воду и азот при выводе установки на стационарный режим. Предпочтение следует отдать алюминийсодержащим композициям [4]. После оксидирования необходимо промывать контур раствором 1—10 мг/кг нитрита натрия (калия) на обессоленной воде в течение 5 ч и более (для замены активизирующих коррозию NO_3^- , Cl^- и др., находящихся в порах и на поверхности магнетита, на ингибирующие). При фиксированных параметрах водно-химического режима система может быть законсервирована на неопределенно длительный срок, например, 10 лет и более. С началом повышения температуры при выводе энергоустановки на стационарный режим нитрит выводят из контура и одновременно начинают дозировать кислород. В конденсатно-питательном тракте АЭС с РБМК кислород образуется за счет радиолитического распада воды и подсоса воздуха в конденсаторах.

При останове энергетической установки и достижении температуры воды в контуре 80—100 °С в систему вновь необходимо вводить нитрит натрия (калия) до концентрации 1—10 мг/кг с прекращением дозирования кислорода. В противном случае без введения нитрита первые признаки разрушения оксидного покрытия (перлитная сталь при температуре до 100 °С в стояночных режимах не способна самопассивироваться) проявляются уже в первые минуты останова. Проводить повторную пассивирующую обработку перед пуском не всегда рационально из-за образования отходов, требующих дальнейшей переработки, и увеличения времени простоя. При правильном ведении водно-химического режима коррозионная стойкость перлитной стали повышается во много раз. Также во много раз снижается концентрация железа в теплоносителе.

Экономический эффект от внедрения предлагаемой технологии может складываться из следующих составляющих:

- многократно уменьшается поступление продуктов коррозии в теплоноситель и их активация в нейтронном потоке ядерного реактора, что позволяет в десятки раз улучшить радиационную обстановку;

- становится не нужной дезактивация контурного оборудования и соответственно снижаются в десятки раз количество отходов, затраты на их переработку, хранение и захоронение;

- повышается надежность работы оборудования за счет снижения коррозионного износа;

- предотвращается перегрев твэлов в результате снижения отложений на их поверхностях и повышается срок службы (особенно при увеличении обогащения ядерного топлива);

- повышается к.п.д. энергоустановок за счет снижения отложений на теплопередающих поверхностях, меньшего простоя в период планово-предупредительного ремонта, капитального предупредительного ремонта, отсутствия необходимости проведения дезактивационных работ;

- снижается нагрузка на ионитные фильтры системы водоочистки;

- становится возможным использовать дешевую и технологичную перлитную сталь в качестве основного конструкционного материала в любых системах, где используется обессоленная вода, и др.

Перечисленные преимущества особенно будут заметны на вновь вводимых блоках при правильном и комплексном их использовании.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ампелогова Н.И., Симановский Ю.М., Трапезников А.А. Дезактивация в ядерной энергетике. М.: Энергоатомиздат, 1982.
2. Крицкий В.Г., Стяжкин П.С., Березина Ю.А. и др. Влияние качества теплоносителя на эксплуатационную надежность элементов оборудования АЭС с РБМК-1000. — Теплоэнергетика, 2000, № 7, с. 2—9.
3. Прозоров В.В. Защита от коррозии перлитной стали в стояночных и переходных режимах ЯЭУ. — Атомная энергия, 1985, т. 58, вып. 3, с. 162—166.
4. Прозоров В.В., Вологодина Г.П. Предпусковая подготовка поверхностей оборудования АЭС, выполненного из сталей перлитного класса. — Теплоэнергетика, 1987, № 9, с. 38—40.
5. Прозоров В.В. Оксидирование перлитных сталей в нитратных растворах. — Защита металлов, 1987, т. 23, № 2, с. 289—292.
6. Солонин М.И., Прозоров В.В., Лысенко А.А. и др. Оксидирование перлитных сталей в нитритных растворах. — Там же, 2002, т. 38, № 5, с. 524—527.

Поступила в Редакцию 26.09.03

УДК 621.039.526

ВОЗМОЖНОСТИ ГЛУБОКОГО ВЫЖИГАНИЯ АМЕРИЦИЯ И НЕПТУНИЯ В АКТИВНОЙ ЗОНЕ БЫСТРОГО НАТРИЕВОГО РЕАКТОРА

Елисеев В.А., Поплавская Е.В. (ГНЦ РФ — ФЭИ им. А.И. Лейтунского)

Наиболее острой проблемой, связанной с функционированием ядерной энергетике, является накопление высокоактивных отходов. Быстрые реакторы с натриевым теплоносителем могут их эффективно утилизировать, поскольку именно они, обладая высокоэнергетическим спектром и высокой плотностью потока нейтронов, способны выжигать наиболее долгоживущую и опасную часть отходов — америций и нептуний, которые выделяются при переработке топлива тепловых реакторов (в топливе ядерных реакторов образуется также кюрий, но в настоящее время целесообразным считается его выдерживать в течение длительного времени). Известны различные способы выжигания америция и нептуния в быстрых реакторах: добавление в топливо традиционных активных зон быстрых реакторов, использование специализированных активных зон с топливом без ^{238}U , содержащим плутоний или ^{235}U и допустимое по условиям ядерной безопасности количество америция и нептуния, или облучательных устройств, которые размещаются на периферии обычной активной зоны. Общим недостатком указанных способов является относительно невысокая глубина их выжигания, что требует многократной повторной переработки. В то же время обращение с ними, т.е. переработка и рефабрикация топлива дороги из-за их высокой активности и тепловыделения [1—3]. Поэтому большой интерес представляет однократное глубокое выжигание (до 90% тяж. ат.) с последующим захоронением в геологические формации без переработки, что позволяет избежать их рециклирования.

В статье рассмотрен способ глубокого выжигания америция и нептуния в специальных сборках, которые состоят из элементов, содержащих выжигаемые нуклиды в инертной матрице, и элементов с гидридом циркония. Расчетно-теоретические исследования показали, что, разместив такие сборки в активной зоне БН-800