

разгрузки пакет извлекается из зоны и вращается вместе с пробками.

Кроме того, предусмотрены четыре горизонтальных пучка для физических исследований, 10 вертикальных неохлаждаемых каналов, в том

числе канал диаметром 300 мм. В активную зону и экран может быть загружено большое число пакетов с образцами (в активную зону до 30 пакетов).

Поступила в Редакцию 18/VII 1966 г.

Влияние материала поверхности контура на активность коррозионных отложений

А. П. ВЕСЕЛКИН, О. Я. ШАХ

УДК 621.039.538.7:621.039.58

Рассматриваются некоторые вопросы радиационной безопасности, связанные с коррозией и активацией конструкционных материалов. Показано, что необходимо учитывать влияние материала поверхности первого контура на образование активных поверхностных отложений. Исследуется справедливость принятой для описания процессов смыва, переноса и осаждения математической модели и некоторых используемых допущений.

Сравнение расчетных и экспериментальных результатов показало их достаточно хорошее совпадение.

Для улучшения радиационной обстановки при проведении ремонтных работ рекомендуется использовать стали, не содержащие элементов, дающих долгоживущие изотопы. Такими сталями могут быть, например, хромомарганцевые стали, наведенная активность которых имеет достаточно короткий период полураспада (марганец) и малый выход γ -квантов на один распад (хром).

Вый взгляд примесей элементов, в особенности таких, которые образуют ядра с большим периодом полураспада.

К таким элементам в первую очередь относится Co^{59} , который обычно присутствует в сталях как элемент, сопутствующий никелю в количествах до 0,9% от содержания последнего [1].

Влияние параметров реакторной системы на образование и перенос активированных продуктов коррозии различно и еще недостаточно изучено. Можно только отметить, что наибольшее влияние на процессы отложения, смыва и переноса активности оказывают такие параметры, как величина рН, содержание кислорода и примесей, а также гидродинамика потока, омывающего поверхности контура.

Ранее [2] с учетом ряда упрощающих предположений было получено решение для системы уравнений, описывающей процессы образования и накопления активности в первом контуре, которая вызвана продуктами коррозии. Для описания этих процессов использовались постоянные смыва k_c и осаждения k_0 .

Влияние материала поверхности первого контура на активность коррозионных отложений исследовалось с помощью математической модели, предложенной в работе [2].

Результаты расчетов

Среднее изменение веса коррозионных отложений на единице поверхности контура за достаточно большой промежуток времени работы T_p может быть представлено в виде (см. работу [2])

$$\bar{N}_p = \frac{C_K}{k_0 + k_c} \left(1 + \frac{k_0 T_p}{2} \right) \quad (1)$$

при постоянной очистке контура $\lambda_\phi = 0$ ($сек^{-1}$) и

$$\bar{N}_p = \frac{C_K (\lambda_\phi + k_0)}{\lambda_\phi k_c} \quad (2)$$

Скорость общей коррозии (0,001 — 0,002 мм/год), характерная для используемых в настоящее время в реакторостроении конструкционных материалов, с точки зрения прочности конструкций вполне безопасна. Но даже при такой незначительной скорости в первом контуре современных водо-водяных реакторов может образоваться до нескольких сот граммов продуктов коррозии в сутки.

На фоне интенсивных потоков излучения работающего реактора влияние γ -излучения активированных продуктов коррозии на мощность дозы за биологической защитой обычно незначительно.

Однако, поскольку потоки нейтронов, активирующих конструкции в реакторе, достигают 10^{13} нейтр/см²·сек, загрязнение поверхностей контура активированными продуктами коррозии и их влияние на уровень активности после остановки системы — в настоящее время самые серьезные из проблем, связанных с коррозией.

При определении активности весьма существен учет даже самых незначительных на пер-

при $\lambda_{\phi} \neq 0$ *. Скорость коррозии C_K (в $мг/м^2 \times \text{сек}$) принимается равной

$$C_K = \frac{1}{T_p} \int_0^{T_p} C_K(t) dt.$$

Если осаждением можно пренебречь ($k_0 = 0$), то из (1) и (2) следует

$$C_K = k_c \bar{N}_p. \quad (3)$$

Из выражения (3) видно, что постоянная смыса k_c равняется постоянной роста коррозионной пленки и легко может быть определена при проведении коррозионных испытаний. Следует обратить внимание, что это справедливо только при условии $k_0 = 0$, которое достаточно хорошо реализуется, например, при автоклавных коррозионных испытаниях на малых образцах.

Наиболее грубое допущение работы [2] — условие $C_K = \text{const}$, принятое для упрощения математической модели. Влияние этого допущения на согласие расчетных и экспериментальных данных проверялось для контура, описанного в работе [3]. С этой целью скорость коррозии представлялась аналитически выражением вида

$$C_K(t) = at^{-b}. \quad (4)$$

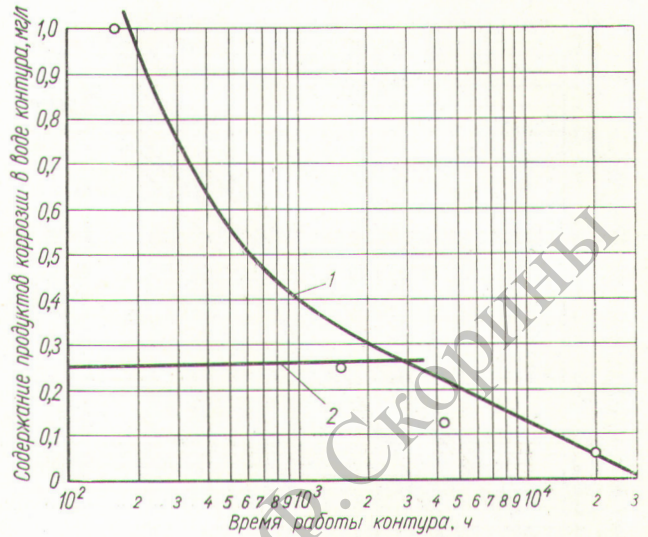
Система уравнений [2] решалась численным методом на электронно-вычислительной машине по программе, составленной совместно с Н. А. Гурьевой и А. В. Никитиным. Расчеты проводились при $k_c = 5 \cdot 10^{-8} \text{ сек}^{-1}$; $k_0 = 3,0 \cdot 10^{-5} \text{ сек}^{-1}$ и $\lambda_{\phi} = 2,5 \cdot 10^{-5} \text{ сек}^{-1}$ [3].

На рис. 1 представлены результаты расчета изменения содержания продуктов коррозии в воде контура в зависимости от времени работы. Экспериментальные значения заимствованы из работы [3]. Величина концентрации через 160 ч работы получена путем пересчета из приведенного в работе [3] изменения скорости коррозии.

Одновременно для проверки правильности равновесных соотношений типа (1) и (2), полученных на основании принятой модели, рассчитывалась скорость коррозии поверхности контура в установившемся режиме ($T_p \approx 15\,000 \div 20\,000 \text{ ч}$) [3] по формуле

$$C_K = \frac{\varepsilon_{\phi} Q_{\phi}}{F_K} \bar{N}_v. \quad (5)$$

* Остальные обозначения здесь и далее заимствованы из работы [2].

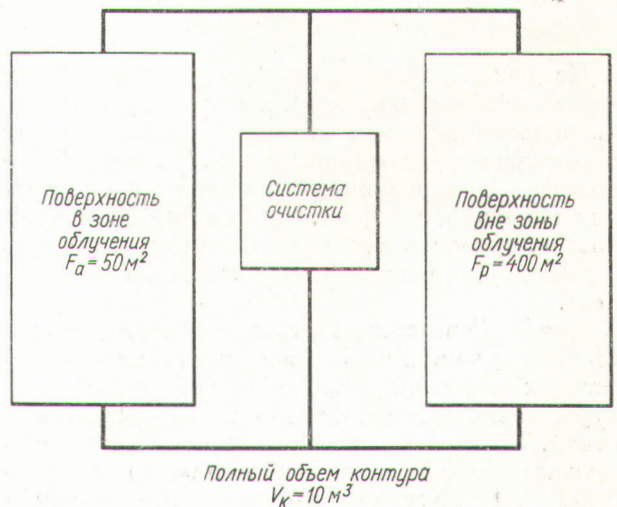


Р и с. 1. Зависимость изменения содержания продуктов коррозии в воде контура от времени работы:

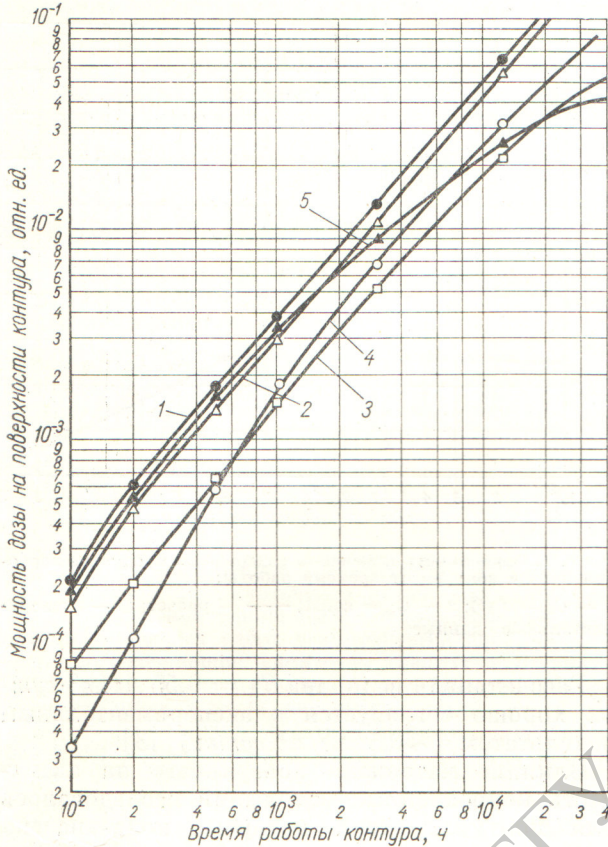
1 — $C_K = f(t)$; 2 — $C_K = \text{const}$; — — расчет; ○ — экспериментальные данные.

Рассчитанная величина $C_K = 0,55 \text{ мг/м}^2 \cdot \text{сутки}$ хорошо согласуется с экспериментальным результатом ($\sim 0,5 \text{ мг/м}^2 \cdot \text{сутки}$) [3].

Влияние материала поверхности на активность коррозионных отложений исследовалось для контура, схема которого показана на рис. 2. В расчетах принималось, что состав продуктов коррозии (по элементам) такой же, как и состав основного металла, а содержание Co^{59} в сталях равно 0,7% от содержания никеля.



Р и с. 2. Схема контура для расчета активности отложений.



Р и с. 3. Зависимость изменения мощности дозы на поверхности контура от времени работы реактора:

1 — весь контур изготовлен из нержавеющей стали [3]; 2 — поверхность активной зоны изготовлена из нержавеющей, а остальная часть контура — из углеродистой стали; 3 — поверхность активной зоны изготовлена из циркалоя, остальная часть контура — из углеродистой стали; 4 — то же, что и 1, но для $C_K = \text{const}$; 5 — то же, что и 1, но содержание кобальта в стали в 14 раз меньше.

На рис. 3 приводятся результаты расчетов мощностей доз на поверхности оборудования, расположенного вне активной зоны реактора и омываемого теплоносителем. Расчеты проводились для различных комбинаций материалов поверхностей контура. Сечения активации изотопов тепловыми нейтронами усреднялись с учетом эффективной температуры нейтронного газа.

Ниже приведены результаты расчетов вклада (в %) в суммарную активность отложений различных изотопов после 12 000 ч работы контура, целиком изготовленного из нержавеющей стали. Здесь же для сравнения даны экспериментальные величины, полученные на реакторе SM-1 [1], контур которого также целиком изготовлен из нержавеющей стали:

	Co ⁶⁰	Co ⁵⁸	Fe ⁵⁹	Cr ⁵¹	Mn ⁵⁴
Эксперимент [1]	26	22,1	14,3	32,5	3,9
Расчет	37,4	37,8	2,6	17,2	4,9

Обсуждение результатов

Как следует из результатов расчетов, принятая математическая модель и используемые постоянные смыва и осаждения довольно правильно описывают накопление продуктов коррозии в воде и на поверхности реакторной системы. Предположение, что скорость коррозии $C_K = \text{const}$, приводит к занижению концентрации неактивных продуктов коррозии в воде и на поверхности контура в первоначальный период работы системы, однако это занижение величины активности отложений не столь значительно, не более чем в два раза (см. кривые 1 и 2 на рис. 1 и кривые 1 и 4 на рис. 3).

Активность отложений при достаточно эффективной системе очистки ($\lambda_{\phi} \geq k_0$), как и следовало ожидать, определяется коррозией и смывом с поверхностей, расположенных в активной зоне. Кривые 1 и 2 на рис. 3 показывают, что вклад в активность отложений поверхностей, расположенных вне активной зоны, не превышает в этом случае 10%.

Отношение активностей $\frac{Co^{60}}{Co^{58}} = 0,99$, рассчитанное для реакторной системы, проработавшей 12 000 ч, хорошо согласуется с величиной, полученной экспериментально [1] и равной 1,17.

Использование для всех долгоживущих элементов одинаковых постоянных смыва, осаждения и эффективности фильтра не является таким грубым допущением, как может показаться вначале. Почти все эти элементы относятся к группе железа и обладают довольно близкими химическими свойствами. Возможно, последнее не совсем справедливо по отношению к цирконию, расчетная величина активности которого с принятыми постоянными смыва и осаждения может быть несколько завышена.

С точки зрения последующей ремонтоспособности реакторной системы наиболее предпочтительно в качестве конструкционных материалов использовать циркониевые сплавы (типа циркалоя) для поверхностей в активной зоне и углеродистую сталь для поверхностей вне активной зоны (см. кривые 1 и 3 на рис. 3). После 12 000 ч работы реакторной системы

мощность дозы, создаваемая отложениями в интервале 0—30 суток после остановки реактора, для варианта 1 (см. рис. 3) примерно в три—пять раз выше, чем для варианта 3 (см. кривую 3). Эта разница будет возрастать при увеличении времени работы системы.

Кривая 5 на рис. 3 характеризует изменение активности отложений на поверхности контура для случая, когда содержание Co^{59} в нержавеющей стали снижено до 0,05% от содержания никеля. В таком случае активность отложений в основном определяется Co^{58} , который образуется за счет (n, p) -реакции на Ni^{58} . Поэтому для улучшения ремонтоспособности реакторной системы с водяным теплоносителем весьма перспективно в качестве конструкционных материалов использовать безникелевые (например, хромомарганцевые) нержавеющие стали, обладающие, естественно, той же корро-

зионной стойкостью. После $\sim 20\,000$ ч работы ($\sim 2,5$ года) системы, изготовленные из такой стали, будут обладать наилучшей с точки зрения радиационной безопасности ремонтоспособностью.

Авторы благодарят Л. И. Корженевскую и Е. М. Воронову за помощь в проведении численных расчетов.

Поступила в Редакцию 9/III 1966 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ф. Дж. Братши и др. В сб. «Коррозия конструкционных материалов водоохлаждаемых реакторов». Под ред. В. П. Погодина. М., Атомиздат, 1965, стр. 329.
2. А. П. Веселкин, О. Я. Шах. «Атомная энергия», 21, 462 (1966).
3. А. Н. Григорьянц. «Атомная энергия», 2, 109 (1957).

Изменение электросопротивления никеля, облученного α -частицами, при отжиге

В. Я. Дехтяр, В. С. Михаленков, В. В. Филипенко, В. И. Сидантьев

УДК 539.12+621.039.553

Исследована кинетика изменения электросопротивления никеля, облученного α -частицами с энергией 5,4 Мэв, в процессе отжига при различных температурах. На кинетических кривых при температурах выше 700°С отмечается сначала возрастание, а затем уменьшение электросопротивления. Такой ход соответствует общим закономерностям распада пересыщенных твердых растворов и связан с выделением пор, наполненных гелием.

Полученные данные согласуются с результатами термических работ, касающихся механизма и кинетики поробразования при распаде пересыщенных растворов металл — благородный газ.

На основании полученных результатов оценен средний размер газовых пор, выделяющихся при различных температурах отжига. Он оказывается равным ~ 140 Å и мало зависит от температуры отжига.

Распухание деформируемых и конструкционных материалов реактора связано с образованием пор в металлах, пересыщенных инертными газами. Известно, что инертные газы чрезвычайно мало растворяются в металлах, поэтому при их искусственном введении, когда возникает большое пересыщение, после повышения температуры немедленно начинается распад пересыщенного твердого раствора, приводящий к образованию в металле газовых пор. Инертные газы для создания пересыщения можно вводить в металлы несколькими спо-

собами, в частности методом бомбардировки α -частицами. При этом некоторая доля α -частиц вследствие поглощения задерживается в металле, что приводит к насыщению его гелием. В настоящей работе этот способ был применен для насыщения гелием никеля.

Фольга толщиной 0,1 мм из никеля чистоты 99,99% предварительно в течение 2 ч отжигалась в вакууме при 900°С и облучалась при температуре 30°С в циклотроне α -частицами со средней энергией 12,4 Мэв. Интегральная доза облучения составляла 10^{14} частиц/см². Из насыщенной гелием облученной фольги изготавливались образцы шириной ~ 2 мм.

Электросопротивление образцов измеряли потенциометрическим методом с точностью 0,05% в ультратермостате при постоянной температуре $35 \pm 0,05$ °С. Отжигали образцы в вакууме при остаточном давлении $5 \cdot 10^{-4}$ торр. Температура отжига измерялась и поддерживалась с точностью ± 5 °С. Величина прироста электросопротивления никеля после облучения указанной дозой составила $\sim 7,7\%$.

На рис. 1 приведена кривая изменения электросопротивления в результате отжига в течение 1 ч при различных температурах. Кривая показывает, что до температуры ~ 700 °С электросопротивление уменьшается, что, види-