

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ РАДИАЦИОННОГО РАСПУХАНИЯ ВЫГОРОДКИ РЕАКТОРА ВВЭР-1000 НА ПЕРИОД ЭКСПЛУАТАЦИИ 30 - 60 ЛЕТ

© 2011 А. С. Кальченко, В. В. Брык, В. Н. Воеводин, Н. П. Лазарев

ННЦ «Харьковский физико-технический институт», Харьков, Украина

По данным распухания стали X18H10T, облученной в быстром реакторе БОР-60 и ускорителе тяжелых ионов ЭСУВИ, построена прогнозная зависимость распухания от температуры и дозы облучения в широком интервале скорости создания смещений. На этой основе прогнозируется распухание по сечению выгородки реактора ВВЭР-1000 в процессе длительной эксплуатации 30 - 60 лет.

Ключевые слова: аустенитная сталь, внутрикорпусные устройства, ионное облучение, реакторное облучение, моделирующая функция.

Введение

Внутрикорпусные устройства (ВКУ) реакторов ВВЭР проектировались как несменные элементы конструкций со сроком эксплуатации, равным ресурсу реактора. Первые серийные блоки ВВЭР приближаются к установленному для них проектному сроку эксплуатации (30 лет). В данное время решается вопрос о возможности продления их ресурса на 10 - 30 лет, в частности обоснования запроектного ресурса ВКУ. Для решения этой задачи требуются данные о поведении материалов ВКУ (в первую очередь – выгородки и шахты реактора) при продолжительном облучении.

Одним из факторов, ограничивающих время жизни аустенитной нержавеющей стали X18H10T, используемой в качестве материала ВКУ реакторов на тепловых нейтронах, является радиационное распухание. Считалось, что при рабочих параметрах тепловых реакторов это явление не проявляется. В 90-е годы прошлого столетия образование пор было обнаружено в ВКУ реакторов типа PWR [1, 2]. Поры также были выявлены в направляющем канале ПЭЛ, облученном в тепловыделяющей сборке (ТВС) на периферии активной зоны реактора ВВЭР-1000 3-го энергоблока Ровенской АЭС, где максимальная скорость набора повреждающей дозы в 1,2 – 1,5 раза выше, чем для выгородки реактора [3]. Показано, что при одинаковой температуре облучения поры в условиях водо-водяного реактора образуются при значительно более низких дозах облучения по сравнению с быстрым реактором. В ряде случаев это связано с низкой скоростью создания повреждений, что может приводить к сдвигу распухания в низкотемпературную область. В быстром реакторе БОР-60 при температурах облучения 400 - 500 °С и дозах ~80 сна при 10 % распухания материал охрупчивается, а при достижении 20 % распухания происходит резкий спад пластичности стали X18H10T (рис. 1) [4, 5]. Такое же поведение нержавеющей стали можно ожидать в реакторах на

тепловых нейтронах при продлении срока их эксплуатации. В настоящее время в чехлах отработавших ТВС реактора БН-350 поры обнаружены при температуре 281 °С, дозе 1,27 сна и скорости создания смещений $0,39 \cdot 10^{-8}$ сна/с. [6].

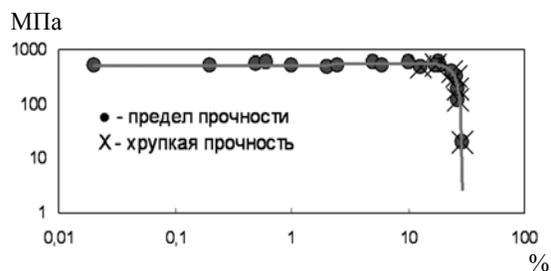


Рис. 1. Зависимость предела прочности стали X18H10T от распухания при температурах испытания 400 - 500 °С [5].

Нейтронно-физические расчеты, использующие метод конечных элементов для двумерных нелинейных задач, проведенные в ОКБ «Гидропресс», показали, что максимальная нейтронная повреждающая доза, выражаемая в смещениях на атом (сна), на отдельных участках выгородки через 30 лет эксплуатации может составить ~ 50 - 75 сна (TRN). На рис. 2 приведено поле повреждающей дозы в сечении выгородки, изображенное изолиниями уровней смещений на атом [7].

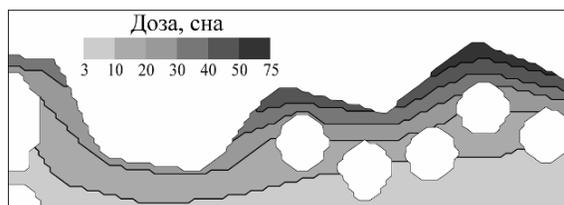


Рис. 2. Распределения повреждающей дозы в материале выгородки за 30 лет работы реактора ВВЭР-1000 [7].

Расчеты температурного поля по сечению выгородки показывают, что максимальная температура материала выгородки может достигать величины $T_{max} = 407$ °С и локализуется в области

малого объема за счет γ -разогрева (рис. 3) [8, 9]. С другой стороны, расчеты, проведенные в Научно-исследовательском институте атомных реакторов (Дмитровград) показывают еще большее значение максимальных температур, достигающее ~ 460 °С [7].

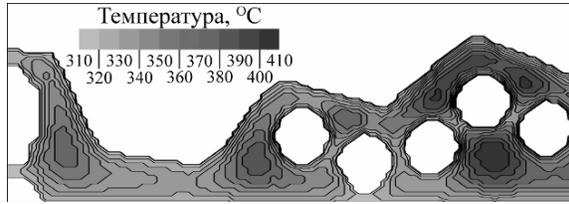


Рис. 3. Температурное поле в поперечном сечении выгородки реактора ВВЭР-1000 [8].

При таких температурах и дозах принципиально возможным является весьма значительное распухание конструкционной стали в отдельных местах выгородки и при названном совпадении параметров распухания, после 30 лет эксплуатации, может достигать ~ 12 %, что приведет к увеличению наружного диаметра выгородки на 5 мм [7].

Несмотря на то, что к настоящему времени имеется большое количество различных экспериментальных результатов по радиационным эффектам в сталях типа X18N10T, полученных в различных реакторных и ускорительных условиях, а также на различных конструктивных элементах, нормативные или взаимосогласованные зависимости распухания от дозы, температуры и скорости создания смещений отсутствуют.

Настоящая работа является продолжением цикла работ, посвященных исследованию структурно-фазовых изменений и распухания выгородки, на основании которых была получена эмпирическая зависимость распухания стали X18N10T от дозы, температуры облучения и скорости создания смещений [10]. С помощью данного уравнения прогнозируется формоизменение выгородки реактора ВВЭР-1000 при сроках эксплуатации вплоть до 60 лет, даются рекомендации о ресурсоспособности материала выгородки.

Моделирующая функция

В работе [10] авторами было получено универсальное уравнение, описывающее распухание стали X18N10T, в широком интервале температур, доз и скоростей создания смещений. Эмпирическая зависимость распухания стали X18N10T от дозы, температуры облучения и скорости создания смещений имеет вид

$$S(k, D, T) = R(k) \cdot \phi(D - D_0(k, T)) \cdot \exp \left\{ - \frac{(T - T_{\max}(k))^2}{2 \cdot \sigma_T^2(k)} \right\}, \quad (1)$$

где $S(k, D, T)$ – распухание, %; D – повреждающая доза, сна; T – температура облучения, °С; k – скорость создания смещений, сна/с; $\phi(x) = x \cdot \theta(x)$ и $\theta(x)$ есть единичная ступенчатая функция Хевисайда: $\theta(x) = 1, x > 0$ или $0, x \leq 0$; $R(k) = r_0 - r_k \ln k$ – скорость распухания на стационарной стадии, %/сна; $D_0(k, T) = d_0 - d_T T + d_k \ln k$ – инкубационный период, сна; $T_{\max}(k) = T_0 + T_k \ln k$ – температура максимума распухания, °С; $\sigma_T(k) = \sigma_0 + \sigma_k \ln k$ – дисперсия температуры, °С. Параметры аппроксимирующих функций найдены для интервала скоростей создания смещений $10^{-2} - 10^{-6}$ сна/с. В данной работе использована функция (1) для прогнозирования распухания выгородки теплового реактора, где типичны скорости создания смещений $10^{-8} - 10^{-9}$ сна/с.

Возникающая при электронно-микроскопических исследованиях общая погрешность в максимуме распухания составляет величину около 20 %, параметры, входящие в выражение (1), имеют следующие значения: $r_0 = 0,25 \pm 0,05$; $r_k = 0,022 \pm 0,005$; $d_0 = 103,0 \pm 0,2$; $d_T = 0,101 \pm 0,004$; $d_k = 2,61 \pm 0,03$; $T_0 = 690,0 \pm 1,3$; $T_k = 15,5 \pm 0,1$; $\sigma_0 = 12,3 \pm 0,5$; $\sigma_k = 1,9 \pm 0,1$.

Следует отметить некоторые особенности моделирующей функции (1). Несмотря на то, что общая погрешность распухания при электронно-микроскопических исследованиях составляет 20 %, полученные погрешности параметров инкубационного периода (d_0, d_T, d_k), температуры максимума распухания (T_0, T_k) и температурной дисперсии (σ_0, σ_k) находятся в значительно более узком интервале. Относительные ошибки параметров инкубационного периода, температуры максимума распухания и дисперсии температуры лежат в интервале 3 - 4 %. Таким образом, зависимость распухания очень чувствительна к выбору данных параметров в отличие от параметров скорости распухания на стационарной стадии (r_0, r_k), для которых относительные ошибки сопоставимы с общей погрешностью распухания 20 %.

Данные, полученные экспериментально и рассчитанные посредством моделирующей функции (1) с учетом погрешностей подгоночных параметров, приведены на рис. 4. Как видно из этих рисунков, относительная ошибка распухания

сильно зависит от дозы и температуры облучения. Относительная ошибка расчетного распухания минимальна ($\sim 20\%$) в областях с максимальным распуханием ($T_{max} = 480^\circ\text{C}$ при 10^{-6} сна/с, 586°C при 10^{-3} сна/с, 620°C при 10^{-2} сна/с) и при дозах выше 50 сна. При температурах, близких к нижнему и верхнему порогам порообразования, а также при дозах в районе инкубационного периода суммарная относительная ошибка расчета составляет 50 - 100%. Сравнение построенных температурных и дозных кривых распухания стали X18H10T показывает, что

в целом полученные зависимости $S(D, T, k)$ удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными при высоких дозах и температурах, близких к максимуму распухания. Модель плохо описывает распухание при дозах вблизи инкубационного периода. Вызвано это тем, что предлагаемая модель слишком грубо учитывает переходную стадию распухания. Это обстоятельство не является критичным, поскольку наибольший практический интерес представляют области высоких доз и большого распухания.

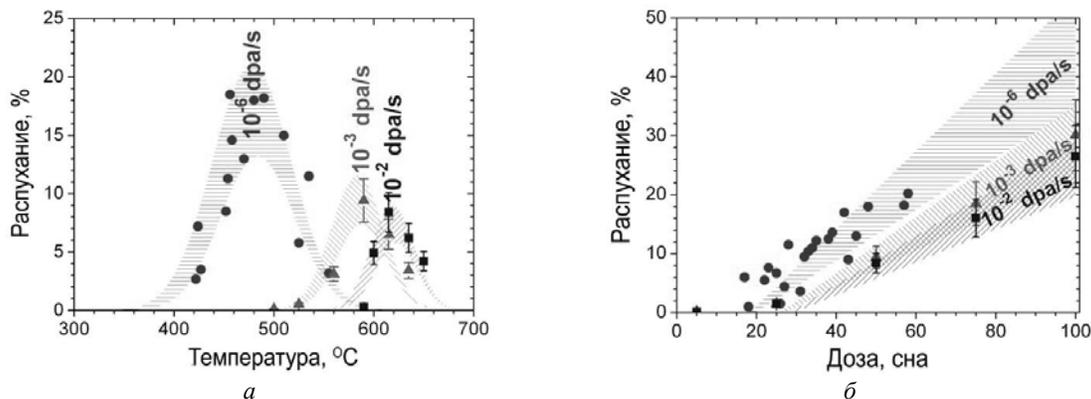


Рис. 4. Сравнение между экспериментальными и расчетными (а) температурными зависимостями распухания при дозе 50 сна и дозными (б) зависимостями распухания при температурах максимума распухания и различными скоростями создания смещений. Символы \bullet , \blacktriangle и \blacksquare соответствуют реакторным данным при 10^{-6} сна/с [11] и ускорительным данным 10^{-3} и 10^{-2} сна/с [10] соответственно. Заштрихованные области отображают ошибку в расчете распухания.

На рис. 5 представлены вычисленные с помощью выражения (1) дозно-температурные карты распухания стали X18H10T с различными скоростями создания смещений, характерными как для облучения на ускорителе ($k = 10^{-3}$ сна/с), так и для реакторов на быстрых ($k = 10^{-6}$ сна/с) и тепловых нейтронах ($k = 10^{-8}$ сна/с).

Как видно из рис. 5, температура, соответствующая максимуму распухания при одинаковых интегральных дозах, сдвигается в область более высоких температур с ростом скорости создания смещений. Этот «температурный сдвиг» объясняется необходимостью воспроизводства уровня вакансионного пересыщения, обеспечиваемого постоянством соотношения между скоростью возникновения точечных дефектов и их исчезновением на стоках [12]. С уменьшением скорости создания дефектов величина радиационного распухания в максимуме ($T_{max} = 586^\circ\text{C}$ при 10^{-3} сна/с, 481°C при 10^{-6} сна/с и 411°C при 10^{-8} сна/с) увеличивается от 9,4 до 17,0% и 23,4% при 50 сна соответственно. Такое поведение распухания обусловлено уменьшением скорости рекомбинации точечных дефектов со сни-

жением скорости смещения атомов, а значит, увеличением числа вакансий, достигающих поры. Следовательно, снижение скорости смещения атомов приводит к росту радиационного распухания.

С увеличением скорости создания смещений температурная зависимость распухания сужается. Нижний температурный предел порообразования с увеличением скорости создания смещений сдвигается в область более высоких температур облучения. При низких скоростях создания смещений инкубационный период сокращается и в этом случае температурная кривая распухания стали сдвигается в сторону более низких температур облучения. При температурах облучения выше максимума распухания диффузионные процессы способствуют отжигу дислокационной структуры, слиянию и растворению пор. При более высоких скоростях создания смещения температурная кривая распухания сдвигается в область высоких температур, где эффективно происходит процесс испарения вакансий из пор. Это приводит к сужению температурного интервала распухания при увеличении интенсивности облучения.

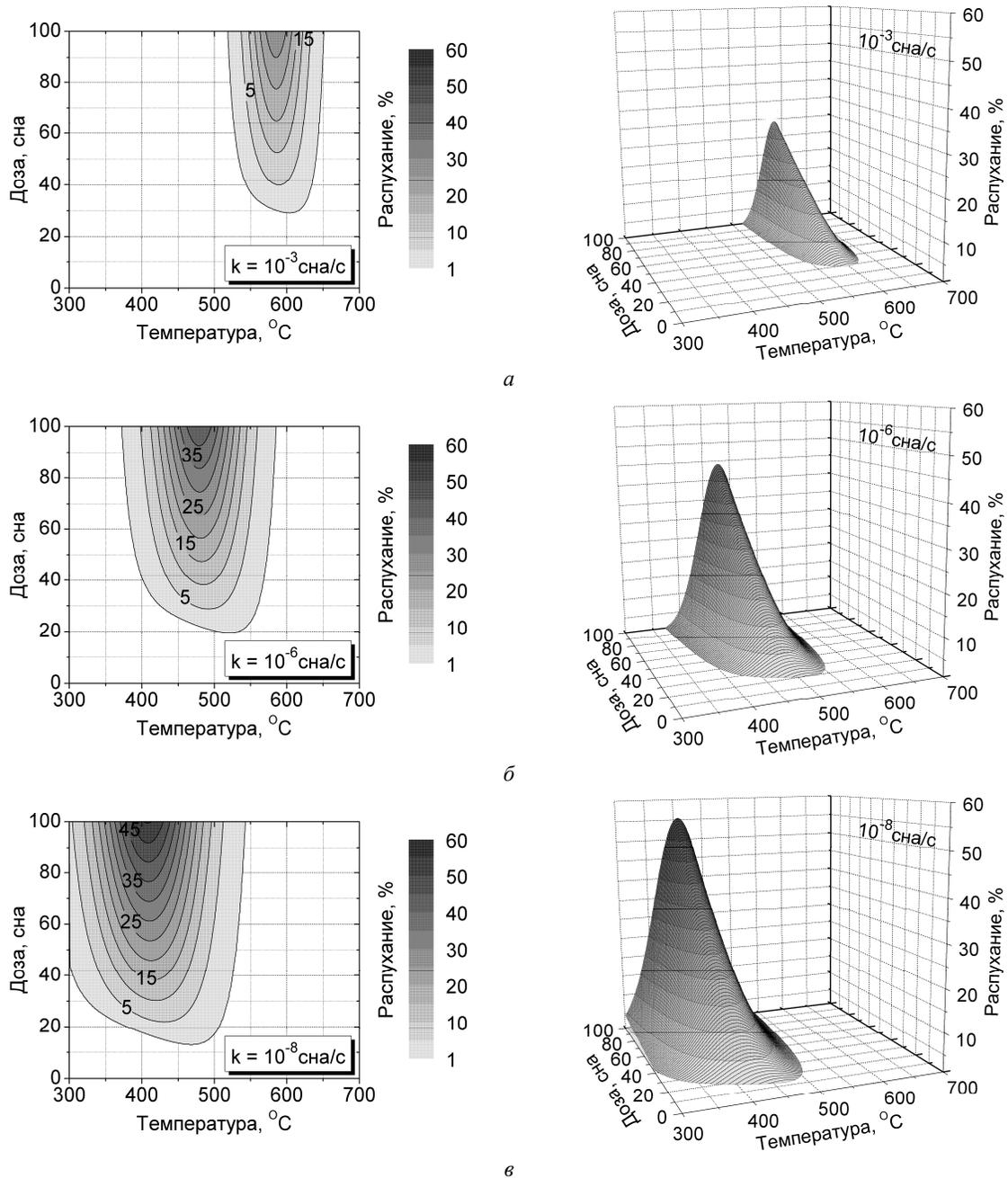


Рис. 5. Температурно-дозные карты распухания стали X18H10T для различных скоростей создания смещений, рассчитанные с помощью моделирующей функции (1).

Уменьшение скорости создания повреждений приводит к уменьшению величины инкубационного периода, а уменьшение температуры облучения к его увеличению. Первое обстоятельство связано с тем, что при увеличении интенсивности облучения растет вклад рекомбинационных эффектов, которые подавляют зарождение пор, и, как следствие, инкубационный период растет. Что касается влияния температуры, то при низких температурах за счет снижения подвижности вакансий инкубационный период также будет более протяженным. Абсолютная величина ин-

кубационного периода в зависимости от температуры облучения оказывается большей при более высоких скоростях создания смещений.

Скорость распухания на стационарной стадии падает с увеличением скорости создания смещений. На эту характеристику, как и в случае инкубационного периода, оказывают влияние рекомбинационные процессы. Если определить скорость распухания через результирующий поток вакансий к порам, то при высоких интенсивностях облучения рекомбинация точечных дефектов будет уменьшать количество дефектов, кото-

рые могут дать вклад в распухание. В связи с этим скорость роста пор уменьшается, а общая величина распухания падает.

Представленные результаты показывают, что с учетом полученного масштабирования по скорости создания смещений основные физические процессы, ответственные за распухание как при облучении тяжелыми ионами, так в быстром и тепловом реакторе, оказываются общими.

Расчет распухания выгородки

При разработке модели для вычисления распухания выгородки реактора ВВЭР-1000 использовалась полученная ранее экстраполирующая функция (1). Как уже было сказано в предыдущем разделе, разработка расчетной модели выполнялась путем сопоставления литературных экспериментальных данных, полученных в быстром реакторе БОР-60, и собственных результатов стали X18N10T, облученной на ускорителе тяжелых ионов ЭСУВИ ННЦ ХФТИ.

Для расчета полей распухания выгородки реактора ВВЭР-1000, помимо дозных и температурных полей по сечению выгородки, необходимо иметь поле распределения скорости создания смещений. Распределение скорости создания смещений в поперечном сечении выгородки можно получить из уравнения

$$k = \frac{D}{КИУМ \cdot t}, \quad (2)$$

где k – скорость создания смещений, сна/с; D – повреждающая доза, сна; t – срок эксплуатации реактора, с; $КИУМ$ – коэффициент использования установленной мощности.

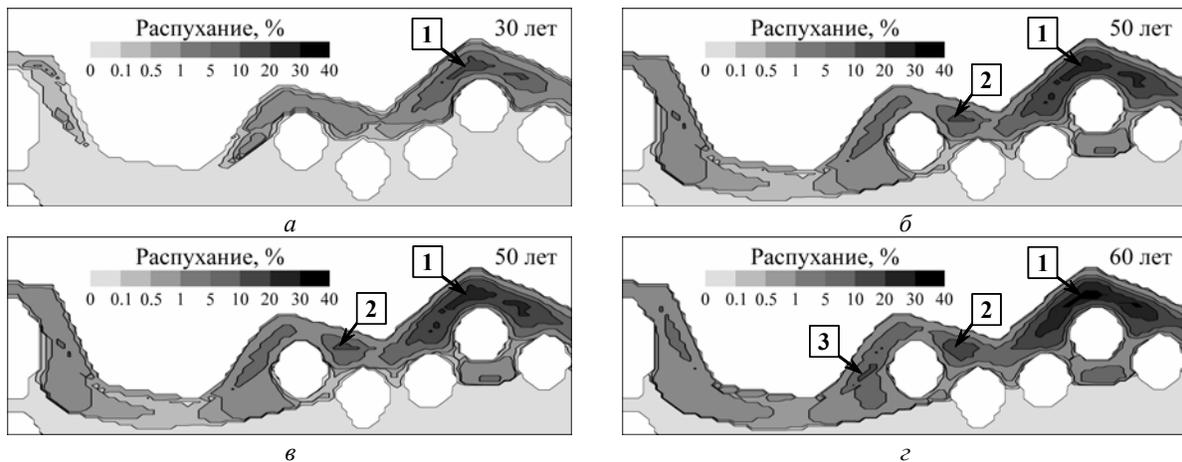


Рис. 7. Поля распухания в поперечном сечении выгородки реактора ВВЭР-1000 после 30 - 60 лет эксплуатации, рассчитанные с помощью выражения (1). Области 1, 2 и 3 соответствуют зонам, где распухание превышает 10 %.

Из полученных данных видно, что по мере увеличения времени эксплуатации распухание выгородки распространяется неравномерно с

Коэффициент использования установленной мощности ($КИУМ$) является комплексным показателем как надежности, так и интенсивности процесса эксплуатации энергоблока. $КИУМ$ представляет собой отношение фактически выработанной электрической энергии к максимально возможной выработке, а для реакторов типа ВВЭР он составляет $\sim 0,8$. Таким образом, в знаменателе выражения (2) находится эффективное время работы реактора ВВЭР-1000, что соответствует 7000 ч работы в год. Полученные результаты представлены в графическом виде на рис. 6. Видно, что в целом дозные и скоростные поля в графическом виде схожи между собой.

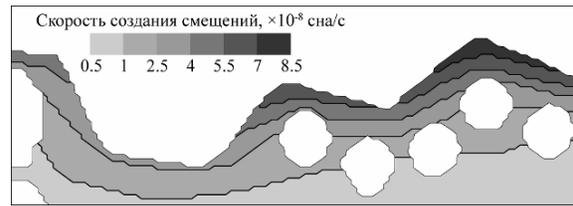


Рис. 6. Поле скорости создания смещений в поперечном сечении выгородки реактора ВВЭР-1000.

Распределение повреждающей дозы по сечению выгородки для 40 лет и более были получены умножением скорости создания смещений на $КИУМ$ и соответствующие времена. Полученные поля в данной работе не приведены, так как графически они ничем не отличаются от рис. 2, а разнятся только лишь абсолютными величинами. Вычисленные с помощью выражения (1) поля распухания по сечению выгородки в процессе длительной эксплуатации 30 - 60 лет представлены на рис. 7.

внутренней стороны поверхности вглубь материала. Максимальное распухание наблюдается не в местах локального максимума температуры

или повреждающей дозы, а является сложной функцией, как от выше упомянутых переменных, так и скорости создания смещений.

Приповерхностный слой внутренней стороны выгородки мало распухает вплоть до 60 лет эксплуатации. После 30 лет наблюдаются только один очаг с максимальным распуханием 11,4 % (область 1 на рис. 7, а). При увеличении срока эксплуатации на 10 лет (до 40 лет) данная область распухания расширится, а максимум распухания достигнет 17,4 % (область 1 на рис. 7, б). Продление работы реактора до 50 лет должно привести к появлению еще одного опасного очага распухания (область 2 на рис. 7, в). Максимальная величина распухания выгородки в области 1 к этому сроку увеличится еще больше и составит 23,6 % (рис. 7, в). Такая величина распухания соответствует резкому падению пластичности материала [4, 5]. При продлении ресурса выгородки до 60 лет количество опасных очагов распухания возрастет до трех, при этом в области 1 распухание может достигать 30,1 % (рис. 7, г).

Скорости создания смещений в областях 1, 2 и 3 рис. 7 составляют $5,9 \cdot 10^{-8}$, $4,6 \cdot 10^{-8}$ и $3,3 \cdot 10^{-8}$ сна/с соответственно, в то время как температура области 1 достигает 395 °С, а для областей 2 и 3 - 375 °С.

Динамика развития распухания в данных точках приведена на рис. 8. Инкубационные периоды для дозных зависимостей сильно не отличаются и составляют 20,2, 21,6 и 20,7 сна; скорости распухания на стационарной стадии достигают 0,43, 0,30 и 0,35 %/сна для областей 1, 2 и 3

соответственно. Кривая 2 на рис. 8, а имеет наибольший инкубационный период и наименьшую скорость распухания. Тем не менее на рис. 7 данная область распухает раньше и сильнее, чем область 3, и к 60 годам эксплуатации распухание достигнет 14,7 %, в то время как для области 3 $S = 10,4$ % (см. рис. 8, б). Вызвано это тем, что доза в области 2 при 60 годах достигнет 70 сна, а в области 3 за тот же промежуток времени – 50 сна. В связи с тем, что кривые 2 и 3 имеют одну и ту же температуру облучения, но разные скорости создания смещений, скорость создания смещений является решающим фактором в распухании этих двух областей. В то же время, несмотря на то, что скорость создания смещений в области 1 самая высокая и можно было ожидать, что кривая 1 на рис. 8, а будет самая низкая, распухание в этой области самое большое из-за влияния температуры.

Исходя из полученных данных (см. рис. 7), можно констатировать, что области выгородки, подверженные максимальным температурам облучения, начинают распухать раньше (см. рис. 7, а), в то время как со временем активизируется влияние скорости создания смещений и дозы (см. рис. 7, г). Таким образом, максимумы распухания выгородки локализованы в тех местах, где складываются наиболее неблагоприятные условия (температура, доза, скорость создания смещений). Кроме того, можно сделать вывод, что максимальное распухание будет наблюдаться между внутренней поверхностью выгородки и охлаждающими каналами.

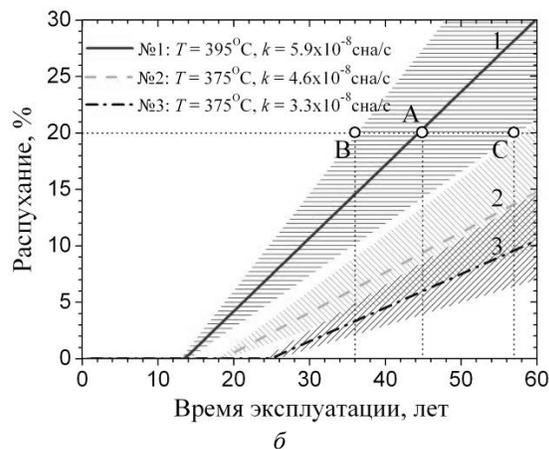
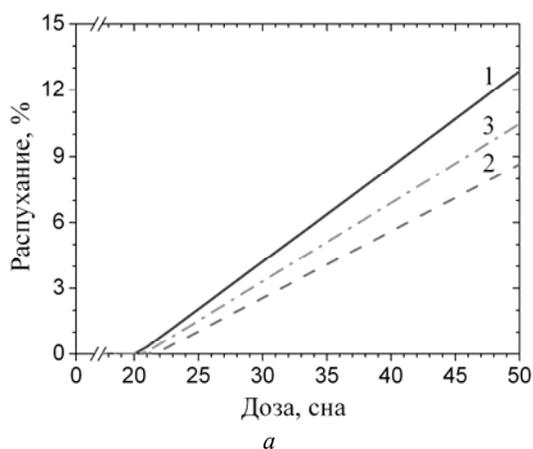


Рис. 8. Дозная зависимость распухания (а) и зависимости распухания от времени эксплуатации (б) стали X18H10T, соответствующие областям с наибольшим распуханием выгородки 1, 2 и 3 рис. 7 (1 – $T = 395$ °С, $k = 5,9 \cdot 10^{-8}$ сна/с; 2 – $T = 375$ °С, $k = 4,6 \cdot 10^{-8}$ сна/с; 3 – $T = 375$ °С, $k = 3,3 \cdot 10^{-8}$ сна/с). Точка А на кривой 1 соответствует полной потере пластичности материала. Точки В и С указывают нижнюю и верхнюю границы критического времени эксплуатации соответственно.

Такие высокие прогнозируемые значения распухания выгородки при длительной эксплуатации могут привести к потенциальным проблемам

безопасности реакторной установки, связанные с нарушением работоспособности ВКУ: образование участков со значительным гради-

ентом распухания (создает трещиноопасные места за счет образования больших напряжений) [13];

изменение водяных зазоров между выгородкой и ТВС (изменяет нейтронно-физические характеристики активной зоны, увеличивая их неравномерность);

уменьшение зазора между выгородкой и шахтой (ухудшает условия охлаждения выгородки и шахты, усугубляя процессы распухания и радиационной ползучести в выгородке);

возможность деформации плоскостей контакта между кольцевыми элементами выгородки (частичное байпасирование расхода через активную зону);

ослабление затяжки крепежа в элементах выгородки (может приводить к вибрациям элементов и разрушению крепежа);

возможность разрушения шахты и выгородки от эксплуатационных термоциклических нагрузок или от динамических термомеханических нагрузок при проектных авариях [9].

Предположение о том, что при изменении места расположения охлаждающих каналов можно существенно выровнять температурное поле и, как следствие, уменьшить температурные напряжения и снизить распухание стали, имеющее место в местах наибольшей температуры [7], справедливо при запроектном использовании данной конструкции.

Как было сказано выше, для стали X18H10T распухание в 20 % и выше приводит к резкому спаду пластичности. Проведя горизонтальную линию на уровне 20 % на рис. 8, б, можно спрогнозировать предполагаемый срок службы выгородки, не превышающий критического уровня распухания. Видно, что только кривая *I* в точке А при 45 годах эксплуатации превысит опасное 20 %-ное распухание.

Если учесть погрешность параметров, входящих в моделирующую функцию (1), то линии рис. 8, б примут вид заштрихованных областей. Верхние и нижние границы всех областей указывают максимально и минимально возможные значения распухания. Верхняя граница распухания крайне пессимистична и указывает на существенное ограничение продления ресурса. Нижняя же граница распухания, наоборот, весьма оптимистична и свидетельствует о потенциальной возможности существенного продления времени эксплуатации. Относительная ошибка распухания в точке А составляет 35 %. Из рис. 8, б видно, что с учетом погрешностей опасное 20 %-ное распухание лежит в интервале 36 - 57 лет (точки В и С соответственно). Исходя из полученных данных, следует с особой осторож-

ностью отнестись к предложениям о продлении срока эксплуатации реакторов типа ВВЭР-1000 на 10 - 30 лет в связи с возможным появлением областей со значительными величинами и градиентами распухания в выгородке.

Следует отметить, что предложенная модель не учитывает влияния газовых трансмутантов, таких как гелий и водород, а также влияния возникающих напряжений и их релаксации. Во внутрикорпусных устройствах тепловых реакторов типа ВВЭР наработка гелия и водорода за 30 лет эксплуатации реактора и внутренние напряжения могут существенно изменить распухание стали X18H10T.

Заключение

Надежность и работоспособность труднодемонтируемых или не подлежащих замене таких узлов, как корпус, опорная решетка, выгородка и др., являются решающими факторами для определения ресурса работы ядерных реакторов. Из-за наличия недостаточно изученных явлений, сопровождающих эксплуатацию реакторных установок, возникает необходимость периодической переоценки фактического состояния конструкций и выполнение прогнозных оценок возможности дальнейшей безопасной эксплуатации. Наиболее ярким примером таких явлений является распухание ВКУ под действием облучения.

В работе исследованы особенности влияния температуры облучения, дозы и скорости создания повреждений на процессы распухания аустенитной нержавеющей стали X18H10T. На основании ранее полученной экстраполирующей функции, графически построены дозно-температурные зависимости распухания стали X18H10T во всех возможных интервалах скоростей создания смещений. Показано, что в целом полученные зависимости $S(D, T, k)$ удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными при высоких дозах и температурах, близких к максимуму распухания. Проанализировано влияние скорости создания смещений (10^{-8} - 10^{-2} сна/с), дозы (1 - 100 сна) и температуры облучения (300 - 700°C).

Определены температурный и дозный интервалы существования пористости при всех исследуемых скоростях смещений. Показано, что с увеличением скорости создания смещений температурная зависимость распухания исследуемой стали сужается, а максимум распухания сдвигается в область более высоких температур облучения. Установлено, что скорость создания смещений влияет как на скорость распухания стали, так и на продолжительность инкубационного

периода. При температурах, соответствующих максимумам распухания стали, при увеличении интенсивности облучения скорость распухания на стационарной стадии падает, а величина инкубационного периода увеличивается. Увеличение температуры облучения сокращает инкубационный период.

Выполнены расчетно-экспериментальные исследования, позволившие рассчитать распухание выгородки реактора ВВЭР-1000 в процессе длительной эксплуатации 30–60 лет.

Функция (1) дает оценку максимальных значений распухания выгородки в зонах, как правило, отсутствия максимальных доз или температур. Распухание в теле выгородки распределено неравномерно, а наблюдаются локальные всплески максимумов. С увеличением времени облучения эти максимумы остаются примерно на том же месте, а абсолютная величина увеличивается с 11 % при 30-летнем сроке эксплуатации до 30 % при 60-летнем, а общее распухание распространяется вглубь выгородки. Максимальное распухание со временем распространяется посе-

редине между внутренней поверхностью выгородки и охлаждающими каналами.

Результаты расчетов позволяют констатировать, что предложенная методика, основанная на экспериментальных данных, позволяет выполнить оценку текущего состояния выгородки о возможности продления или прекращения ее эксплуатации.

На основании полученных данных можно сделать вывод, что материал выгородки за время проектной эксплуатации не исчерпал свой ресурс. Появление локальных областей с критическим 20 %-ным распуханием можно ожидать при 36 - 57 годах эксплуатации.

Полученные оценки распухания показывают, что предлагаемое продление ресурса реакторов типа ВВЭР-1000 до 60 лет без замены выгородки представляется слишком оптимистичным.

Результаты исследований, изложенные в данной работе, могут применяться при определении срока эксплуатации действующих АЭС и возможности их продления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Garner F.A., Greenwood L.R., Harvold D.L.* Potential High Fluence Response of Pressure Vessel internals constructed from Austenitic Stainless Steels // Sixth Int. Symp. on Environmental degradation of Materials in Nuclear Power Systems - Water Reactors / Ed. by R.E. Gold and E.P. Simonen. - The Minerals, Metals and Materials Society, 1993. - P. 783 - 790.
2. *Edwards J., Simonen E.P., Garner F.A. et al.* Influence of irradiation temperature and dose gradients on the microstructural evolution in neutron-irradiated 316SS // J. Nucl. Mater. - 2003. - Vol. 317, Iss. 1. - P. 32 - 45.
3. *Неустроев В.С., Дворецкий В.Г., Островский З.Е. et al.* Исследования микроструктуры и механических свойств стали X18H10T после облучения в активной зоне реактора ВВЭР-1000 // ВАНТ. Сер. «Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение». - 2003, № 3 (83). - С. 73 - 78.
4. *Garner F.A., Edwards D.J., Bruemmer S.M. et al.* Recent developments concerning potential void swelling of PWR internals constructed from austenitic stainless steels // Contribution of Materials Investigation to the Resolution of Problems Encountered in Pressured Water Reactors: Int. Symp. (Fontevraud, 5 Sept. 2002). (CD format, no page numbers).
5. *Неустроев В.С., Голованов В.Н., Шамардин В.К.* Радиационное охрупчивание материалов ТВС в температурном интервале максимума распухания // Атомная энергия. - 1990. - Т. 69, вып. 4. - С. 223 - 226.
6. *Цай К.В.* Микроструктурные особенности радиационного распухания и упрочнения аустенитных нержавеющих сталей, облученных в реакторах БН-350 и ВВР-К: Дис. ... д-ра физ.-мат. наук: 01.04.07. - Алматы, 2010. - 242 с.
7. *Троянов В.М., Лихачев Ю.И., Хмелевский М.Я. и др.* Оценка и анализ термомеханического поведения элементов ВКУ реакторов ВВЭР с учетом эффектов облучения // Сб. докл. 5-й межотрасл. конф. по реакторному материаловедению (Дмитровград, 8 - 12 сент. 1997 г.). - Дмитровград, 1998. - Т. 2, Ч. 1. - С. 3 - 18.
8. *Неустроев В.С., Белозеров С.В., Макаров Е.И., Островский З.Е.* Экспериментальные исследования влияния типа напряженного состояния на радиационное распухание и ползучесть аустенитных сталей // Отрасл. семинар «Физика радиационных повреждений материалов атомной техники» г. Обнинск, 21 - 23 апр. 2009 г.
9. *Шарый Н.В.* Методы расчетного обоснования прочности и динамика конструкций реакторных установок для АЭС с ВВЭР: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.14.03, 01.02.06. - Подольск, 2008.
10. *Kalchenko A.S., Bryk V.V., Lazarev N.P. et al.* Prediction of swelling of 18Cr10NiTi austenitic steel over a wide range of displacement rates // J. Nucl. Mater. - 2010. - Vol. 399, Iss. 1. - P. 114 - 121.
11. *Вотинов С.Н., Прохоров В.И., Островский З.Е.* Облученные нержавеющие стали. - М.: Наука, 1987. - 128 с.
12. *Зеленский В.Ф., Неклюдов И.М., Черняева Т.П.* Радиационные дефекты и распухание металлов. - К.: Наук. думка, 1988. - 296 с.
13. *Марголин Б.З., Федорова В.А., Курсевич И.П. и др.* Проблемы и подходы к оценке работоспособности элементов ВКУ ВВЭР: Междунар. науч.-техн. конф. «Конструкционная прочность материалов и ресурс оборудования АЭС» (Киев, 20 - 22 мая 2009 г.).

**ПРОГНОЗУВАННЯ РАДІАЦІЙНОГО РОЗПУХАННЯ ВИГОРОДКИ РЕАКТОРА ВВЕР-1000
НА ПЕРІОД ЕКСПЛУАТАЦІЇ 30 - 60 РОКІВ****О. С. Кальченко, В. В. Брик, В. М. Воєводін, М. П. Лазарєв**

За даними розпухання сталі X18H10T, опроміненої у швидкому реакторі БОР-60 та прискорювачі важких іонів ЕСУВІ, побудована прогнозна залежність розпухання від температури та дози опромінення в широкому інтервалі швидкостей створення зсувів. На цій основі прогнозується розпухання за перерізом вигородки реактора ВВЕР-1000 у процесі тривалої експлуатації 30 - 60 років.

Ключові слова: аустенітна сталь, внутрішньокорпусні пристрої, іонне опромінення, реакторне опромінення, моделююча функція.

**PREDICTION OF RADIATION SWELLING OF VVER-1000 REACTORS BAFFLE RING
FOR SERVICE LIFE UP TO 30 – 60 YEARS****O. S. Kalchenko, V. V. Bryk, V. M. Voyevodin, M. P. Lazarev**

In the paper based of data concerning the swelling of steel 18Cr10NiTi under irradiation in BOR-60 fast reactor and ESUVI heavy ion accelerator prediction dependence of swelling from the temperature and irradiation dose in the wide range of dose rates is presented. These are used to calculate the cross-sectional swelling of the baffle ring of VVER-1000 reactor during extended service life 30 - 60 years.

Keywords: austenitic steel, pressure vessel internals, ion irradiation, reactor irradiation, modeling function.

Поступила в редакцію 04.01.11,
после доработки - 17.03.11.