

ТЕОРИЯ  
МЕТАЛЛОВ

УДК 621.039.531

МОДЕЛЬ ЗАКЛЮЧИТЕЛЬНОГО ЭТАПА СТАДИИ  
НЕСТАЦИОНАРНОГО РАДИАЦИОННОГО РАСПУХАНИЯ МЕТАЛЛОВ

© 2020 г. А. В. Козлов<sup>а, \*, \*\*</sup>, И. А. Портных<sup>а</sup>, А. Р. Исинбаев<sup>а</sup>

<sup>а</sup>Институт реакторного материаловедения ИРМ, Свердловская обл., а/я, 29, Заречный, 624250 Россия

\*e-mail: kozlov\_alv@irmatom.ru

\*\*e-mail: sashok-k48@mail.ru

Поступила в редакцию 19.12.2019 г.

После доработки 19.02.2020 г.

Принята к публикации 25.02.2020 г.

Для прогнозирования остаточного ресурса твэлов реакторов на быстрых нейтронах по критерию достижения распухания 15%, разработана модель заключительного этапа стадии нестационарного распухания. С использованием вида гистограммы распределения пор по размерам, сформулирован критерий достижения этого этапа. Определен набор характеристик радиационной пористости, достаточный для количественного описания процесса распухания внутриреакторных конструкций. Проиллюстрированы возможности использования модели для прогнозирования остаточного ресурса оболочек твэла из стали ЭК164 после эксплуатации в реакторе БН-600 до достижения максимальной повреждающей дозы 99 сна.

*Ключевые слова:* аустенитная сталь, нейтронное облучение, реакторное облучение, распухание, интегральная площадь пор, концентрация точечных дефектов, критический диаметр пор

**DOI:** 10.31857/S0015323020070049

## ВВЕДЕНИЕ

Обобщение результатов исследований явления распухания, проведенных в течение 20 лет после его открытия, привели к эмпирической модели, согласно которой при нейтронном облучении можно выделить три стадии: инкубационную, когда распухание близко к нулю, нестационарную, когда скорость распухания увеличивается, и стационарную, когда его скорость практически не изменяется [1]. На каждой стадии происходит много различных взаимосвязанных процессов, включающих первичную радиационную повреждаемость, формирование и накопление различных комплексов точечных дефектов, эволюцию дислокационной и зеренной структуры и изменения фазового состава, которые, в свою очередь, влияют на ход первичных процессов. Причем протекание этих процессов зависит от большого количества параметров, многие из которых известны с недостаточной точностью. Все это осложняет прогнозирование на длительный период распухания и других радиационно-индуцированных процессов. Вероятно, поэтому количественной модели распухания, позволяющей описывать его в широком диапазоне температур и скоростей генерации атомных смещений (далее по тексту – скоростей смещений), до сих пор не разработано. Одним из рациональных путей развития модели радиационного распухания является

разработка моделей его этапов, их валидация, уточнение параметров и сшивка (согласование) между собой.

Особенно остро проблема радиационного распухания стоит при поиске путей повышения эффективности работы тепловыделяющих сборок (ТВС) реакторов на быстрых нейтронах, где материал испытывают большие дозовые нагрузки. С этой целью модернизируются существующие и разрабатываются новые конструкционные материалы оболочек твэлов [2]. Постановка опытных ТВС и разрешение надзорных органов на продление их эксплуатации требует обоснованного прогнозирования остаточного ресурса оболочек твэлов, прошедших эксплуатацию в реакторе.

Целью представленной работы является разработка модели заключительного этапа стадии нестационарного распухания металлов, и ее использование, в частности, для прогнозирования остаточного ресурса эксплуатации конструкций, отработавших в реакторе.

## ЗАКЛЮЧИТЕЛЬНЫЙ ЭТАП СТАДИИ НЕСТАЦИОНАРНОГО РАСПУХАНИЯ

Инкубационный период распухания заканчивается, когда диаметр гелий-вакансионных зародышей пор достигает критического размера, после ко-

торого они растут за счет несбалансированного потока в них вакансий [3, 4]. На гистограммах распределения пор по размерам объекты с диаметром меньше критического являются гелий-вакансионными зародышами пор. Переход в класс “вакансионных” пор знаменует начало стадии нестационарного распухания. При этом увеличивается как концентрация пор, так и их диаметр.

По мере развития этого процесса, интегральная площадь поверхности пор растёт, увеличивается их роль в качестве стоков для точечных дефектов. Это приводит к уменьшению стационарных концентраций точечных дефектов и, как следствие, к увеличению критического диаметра зародыша пор. Переход зародышей в класс пор начинается при достижении больших диаметров, что блокирует этот процесс [5]. Концентрация пор перестает расти, что и является признаком наступления заключительного этапа стадии нестационарного распухания.

Эволюция ансамбля пор на заключительном этапе стадии нестационарного распухания управляется двумя процессами: ростом диаметра пор из-за поступления в них несбалансированного потока вакансий и коалесценцией пор (слиянием при касании растущих пор). При первом процессе увеличивается диаметр пор при их неизменной концентрации, что приводит к росту интегральной площади поверхности пор. При коалесценции увеличивается средний диаметр пор, но уменьшается их интегральная площадь поверхности и концентрация.

Рассмотрим ансамбль пор, описываемый гистограммой распределения пор по размерам  $n_i(d_i)$ . Как показано в работе [6], скорость роста диаметра поры  $v$  зависит от несбалансированного потока в нее вакансий и не зависит от самого диаметра. За время  $\Delta t$  диаметр всех пор увеличится на  $v \cdot \Delta t$ . При подрасте поры  $i$  область захвата пор диаметром  $d_j$  составит

$$\begin{aligned} \Delta V_{ij} &= \frac{\pi}{6}((d_i + \Delta d_i + \Delta d_j)^3 - d_i^3) = \\ &= \frac{\pi}{2}d_i^2(\Delta d_i + \Delta d_j). \end{aligned} \quad (1)$$

Количество  $j$ -пор, попавших в область захвата, равно

$$\Delta n_{ij-} = v \Delta t n_j \pi d_i^2. \quad (2)$$

Чтобы найти количество всех пор, коалесцирующих с порой  $i$  при ее подрасте, просуммируем по  $j$ , получим

$$\Delta n_{i-} = v \Delta t n \pi d_i^2.$$

Количество всех коалесцирующих пор получается суммированием по  $i$ :

$$\Delta n_- = \frac{v \Delta t}{2} n^2 \pi d_{as}^2 = \frac{v \Delta t}{2} n F_v, \quad (3)$$

где  $d_{as}$  – среднеквадратичный диаметр пор. Двойка в знаменателе учитывает, что поры коалесцируют парами, поэтому уменьшение количества пор происходит наполовину от всех пор, участвующих в коалесценции).  $F_v = \pi n d_{as}^2$  – интегральная площадь поверхности пор, суммирование ведется по вакансионным порам (исключая гелий-вакансионные зародыши).

Если выразить среднеквадратичный диаметр через средний как  $d_{as} = k_s d_a$ , то для коэффициента связи среднеквадратичного и среднего диаметров пор получается выражение

$$k_s^2 = \frac{F_v}{\pi n d_a^2}. \quad (4)$$

По мере изменения гистограммы в процессе роста и коалесценции пор  $k_s$  будет изменяться. При этом соотношение (4) можно использовать при описании эволюции ансамбля пор.

Характеристикой, линейно связанной со средним диаметром пор, является интегральная длина проекций пор на плоскость изображения ( $L$ ). При слиянии пор диаметром  $d_j$  и  $d_i$  получается пора диаметра  $(d_i^3 + d_j^3)^{1/3}$ , отсюда для изменения  $L$  имеем:

$$\Delta L = \pi \left( \frac{1}{2} \sum_{i,j=1}^{\Delta n} n_i n_j (d_i^3 + d_j^3)^{1/3} + \sum_{i,j=1}^{n-\Delta n} n_i \Delta d_i \right).$$

При суммировании индексы не разделяются, поэтому провести процедуру свертки, аналогичную использованной при расчете концентраций, не удается. Когда поры дорастают до касания друг друга, они сливаются в одну, которая в течение короткого времени обретает сферическую форму. Этот процесс называется коалесценцией пор. При описании эффектов коалесценции использовано приближение средних значений. Будем считать, что все поры имеют одинаковый средний диаметр (усреднение проводится по гистограмме распределения пор по размерам), а вероятность коалесценции  $\omega = \frac{\Delta n_-(t)}{n(t)}$ , тогда

$$\Delta L = \pi \left( \omega n d_a \left( \frac{1}{2} 2^{1/3} - 1 \right) + (1 - \omega) n v \Delta t \right).$$

После математических преобразований формула приводится к виду

$$\begin{aligned} \Delta L(t) &= \pi v \Delta t n (d_a F_v (2^{-2/3} - 1) + 1) = \\ &= \pi v \Delta t n (1 - 0.37 d_a F). \end{aligned}$$

С другой стороны,

$$\Delta L(t) = L(t + \Delta t) - L(t) = \pi (n \Delta d_a - d_a \Delta n_-). \quad (5)$$

Отсюда

$$\Delta d_a = v \Delta t (d_a F_v \times 0.13 + 1). \quad (6)$$

При расчете изменения площади поверхности пор за время  $\Delta t$  будем считать, что сначала все поры подросли, а затем  $\Delta n_-$  пар пор слились. Для расчета площадей надо использовать не средние, а среднеквадратичные значения диаметров.

При слиянии двух пор диаметром  $d_{as}$  суммарная площадь изменяется на  $2\pi d_{as}^2(2^{-1/3} - 1)$ .

Так как у нас слилось  $\Delta n_-$  пар, то площадь изменилась на

$$\begin{aligned} & -2\pi d_{as}^2 \Delta n_- (1 - 2^{-1/3}) = \\ & = -n F_v \pi d_{as}^2 (1 - 2^{-1/3}) v \Delta t. \end{aligned}$$

Из-за подраста пор она увеличилась на

$$2\pi n d_{as} \Delta d_a = 2\pi n d_{as} (d_{as} F_v 0.13 + 1) v \Delta t.$$

Таким образом, суммарное изменение площади составило:

$$\Delta F_v = \pi n d_{as} (2 - 0.11 d_{as} F_v) v \Delta t. \quad (7)$$

При поглощении (испускании) порой точечного дефекта (вакансии или междоузлия) изменяется ее поверхностная энергия. При диаметре поры 0.9 нм в элементарном акте поверхностная энергия изменяется на 0.5 эВ, что дает значительный вклад в общий баланс изменения энергии. Однако это изменение уменьшается по мере роста диаметра поры. Так, для диаметра поры 10 нм увеличение поверхностной энергии при поглощении вакансии составляет 0.04 эВ, а для диаметра 20 нм – 0.02 эВ. Это позволяет при расчете интегрального несбалансированного потока вакансий в поры использовать приближение пор среднего диаметра, когда изменения поверхностной энергии при поглощении точечного дефекта принято считать равными изменению энергии поры среднего диаметра. В этом случае приращение пористости находится из соотношения

$$\Delta P = aj F_v \Delta t, \quad (8)$$

где  $j = j_{v+} - j_{v-} - j_{i+}$  – несбалансированная плотность потока вакансий, является разностью:

– вакансий, поступающих в пору:

$$j_{v+} = \frac{4c_v \pi ((d/a)^2 + 2(d/a) + 4/3) v}{1 + 3 \exp(-(E_v - U)/kT)} \exp\left(-\frac{E_{mv}}{kT}\right);$$

– вакансий, испаряющихся из поры:

$$j_{v-} = \frac{4\pi ((d/a)^2 - 2(d/a) + 4/3) v}{1 + \exp((E_v - U)/kT)} \exp\left(-\frac{E_{mv}}{kT}\right);$$

– поступающих в пору междузельных атомов:

$$j_{i+} = \frac{4c_i \pi a ((d/a)^2 + 2(d/a) + 4/3) v}{1 + 3 \exp(-(E_i + U)/kT)} \exp\left(-\frac{E_{mi}}{kT}\right) \quad [5].$$

В приведенных выражениях для плотности потоков ТД,  $E_v, E_i$  – энергии образования вакансий и междоузлий;  $E_{mv}, E_{mi}$  – их энергии миграции;  $U$  – изменение поверхностной энергии поры при элементарном акте поглощения вакансии.

В приближении, когда диаметр всех пор можно считать равным среднему диаметру, скорость роста диаметра поры можно считать равной:

$$\dot{d} = 2aj. \quad (9)$$

Как было показано в работе [6], скорость изменения диаметра пор в широком диапазоне температур облучения не зависит от диаметра, что свидетельствует о корректности приближения, в котором получено выражение (9).

### СХЕМА ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МОДЕЛИ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ РАЗВИТИЯ ПОРИСТОСТИ

На материале после эксплуатации проводятся микроструктурные исследования, а также измерения размеров оболочек твэлов и определение гидростатической плотности. По полученным данным находят характеристики зеренной, дислокационной и двойниковой структур. Результаты сканирующей электронной микроскопии используют также для оценки пространственной неоднородности пор, что учитывается при выборе участков для изучения методами просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ).

Для выбранных участков строят гистограммы распределения пор по размерам. По гистограммам определяют, насколько полученное состояние соответствует началу заключительного этапа стадии нестационарного распухания. Затем по ним рассчитываются характеристики пористости, входящие в Модель ( $n, d_a, d_s, F_v, L, P, S$ ).

Из уравнений баланса точечных дефектов (ТД), полученных в модели миграции, рассчитывают квазистационарные концентрации вакансий и междузельных атомов на момент окончания эксплуатации, а также плотности потоков ТД и несбалансированная плотность потока вакансий в пору среднего диаметра.

Выбирается временной шаг  $\Delta t$  и по вышеприведенным формулам рассчитывают изменения базовых характеристик пористости. Временной шаг должен удовлетворять требованию, чтобы прошедшие за него изменения характеристик были много меньше самих характеристик.

Дальше с новым набором характеристик повторяют аналогичные вычисления, в результате чего получают временную зависимость характеристик ансамбля пор, в частности, величины пористости  $P(t)$  и распухания  $S(t)$ . Достижение принятого в качестве предельного значения распухания



**Рис. 1.** Схема проведения расчета характеристик пористости на заключительном этапе стадии нестационарного распухания.

ния оболочек твэлов БН-600 (БН-800)  $S_{\text{lim}} = 15\%$  (соответственно  $P_{\text{lim}} = 13\%$ ) означает исчерпание ресурса по распуханию.

Поскольку приходится делать достаточно много временных шагов, процедура эта при использовании обычных ПК требует длительного времени. Однако результаты, полученные при отработке методики в широком диапазоне изменения удельной площади поверхности пор (от  $10^5$  до  $10^7 \text{ м}^{-1}$ ), показали, что зависимость  $j(F_v)$ , а следовательно, и  $v(F_v)$ , может быть описана аналитически с использованием следующей процедуры. Весь диапазон изменения  $F_v$  разбивали на два интервала, в каждом из которых зависимость  $j(F_v)$  хорошо аппроксимируется простой экспоненциальной функцией, но с разными значениями параметров для интервалов, с коэффициентом корреляции  $R^2 \in [0,93; 1,0]$ . Это позволяет использовать данную зависимость, а не проводить на каждом временном шаге расчет концентраций ТД и плотностей потоков вакансий и межузельных атомов, что существенно ускоряет процедуру.

Схема проведения расчета развития радиационной пористости на заключительном этапе стадии нестационарного распухания приведена на рис. 1.

#### ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МОДЕЛИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА ОБОЛОЧЕК ТВЭЛОВ БН

Модель была использована для прогнозирования остаточного ресурса твэла с оболочкой из стали ЭК164, изготовленной по усовершенствованной технологии, и прошедшей эксплуатацию в реакторе БН-600 до достижения максимальной дозы 99 сна. После поступления твэла на послереакторные исследования из оболочки были изготовлены 5 образцов для ПЭМ, на которых была исследована микроструктура, в частности, определены характеристики радиационной пористости. Параметры облучения исследованных образцов приведены в табл. 1.

Для расчетов радиационно-индуцированных процессов в стали ЭК164 использовали оптимизированный набор энергетических характери-

**Таблица 1.** Характеристики облучения исследованных образцов стали ЭК164-ИД

№ образца	Температура облучения $T$ , К	Скорость набора дозы $G$ , $10^{-6}$ сна/с	Поврежд. доза, сна
1	721	1.16	88
2	755	1.30	99
3	775	1.30	99
4	787	1.26	96
5	817	0.84	64

**Таблица 2.** Энергетические характеристики собственных точечных дефектов в стали ЭК164-ИД

Характеристика	Обозначение	Значение, эВ
Энергия образования вакансии [7]	$E_v$	1.8
Энергия образования межузельного атома [8]	$E_i$	4.2
Энергия миграции вакансии в диапазоне температур 717–817 К [9]	$E_{mv}$	1.13–1.14
Энергия миграции межузельного атома [9]	$E_{mi}$	0.27
Энергия связи вакансии с дислокацией*	$E_{vd}$	0.2
Энергия связи межузельного атома с дислокацией*	$E_{id}$	0.8
Энергия связи вакансии с границами зерен*	$E_{vb}$	0.15
Энергия связи межузельного атома с границами зерен*	$E_{ib}$	0.6
Энергия связи вакансии с границами двойников*	$E_{vt}$	0.1
Энергия связи межузельного атома с границами двойников*	$E_{it}$	0.2
Энергия связи вакансии с порой*	$E_{vv}$	1.7
Энергия связи межузельного атома с порой*	$E_{iv}$	4.2

\* Значение, оптимизированное по сопоставлению с экспериментальными результатами, полученными на стали ЭК164.

стик собственных точечных дефектов, приведенный в табл. 2.

С использованием этих значений и измеренных характеристик микроструктуры в рамках уравнений баланса точечных дефектов [6] были рассчитаны значения критического диаметра вакансионного зародыша пор в начале облучения и на момент его окончания. Полученные температурные зависимости приведены на рис. 2.

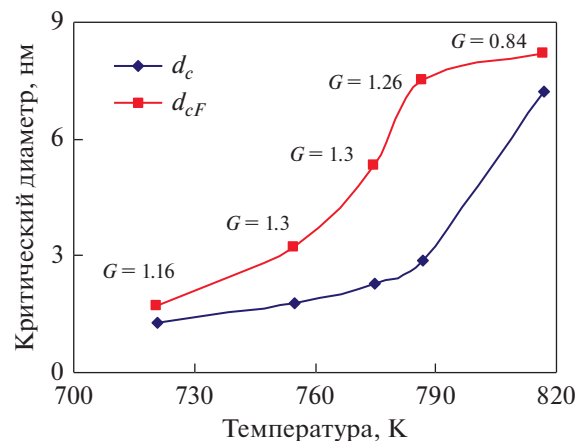
По результатам электронно-микроскопических исследований были построены гистограммы распределения пор по размерам.

Мелкие поры в большинстве своем являются гелий-вакансионными зародышами пор диаметром меньше критического. По мере дорастания до критического размера они переходят в класс вакансионных пор, размер которых увеличивается за счет несбалансированного потока в них вакансий (а не контролируется поступлением гелия). С ростом интегральной площади поверхности пор уменьшается квазистационарная концентрация точечных дефектов, что приводит к увеличению критического диаметра пор (рис. 2) – граница перехода из зародышей в поры сдвигается вправо, что блокирует переход. Концентрация пор перестает увеличиваться.

Это подтверждает наблюдаемое на гистограммах отделение пика зародышей от остальных пор, рис. 3, и является признаком наступления заключительного этапа стадии нестационарного распухания. Так что дальнейшая эволюция пористости во всех образцах (табл. 1) корректно описывается представленной моделью.

В результате обработки гистограмм были получены характеристики пористости, входящие в уравнения, описывающие эволюцию ансамбля пор при облучении, часть из которых приведена в табл. 3.

С использованием характеристик пористости по описанной выше схеме был проведен расчет остаточного ресурса для каждого образца. Были получены зависимости характеристик пористости от времени эксплуатации. На рис. 4 показаны временные зависимости пористости и интегральной площади поверхности пор для образца № 3, достигшего за время эксплуатации самого большого



**Рис. 2.** Расчетная температурная зависимость критического диаметра вакансионного зародыша пор в стали ЭК164 в начале ( $d_c$ ) облучения и на момент его окончания ( $d_{cF}$ ).

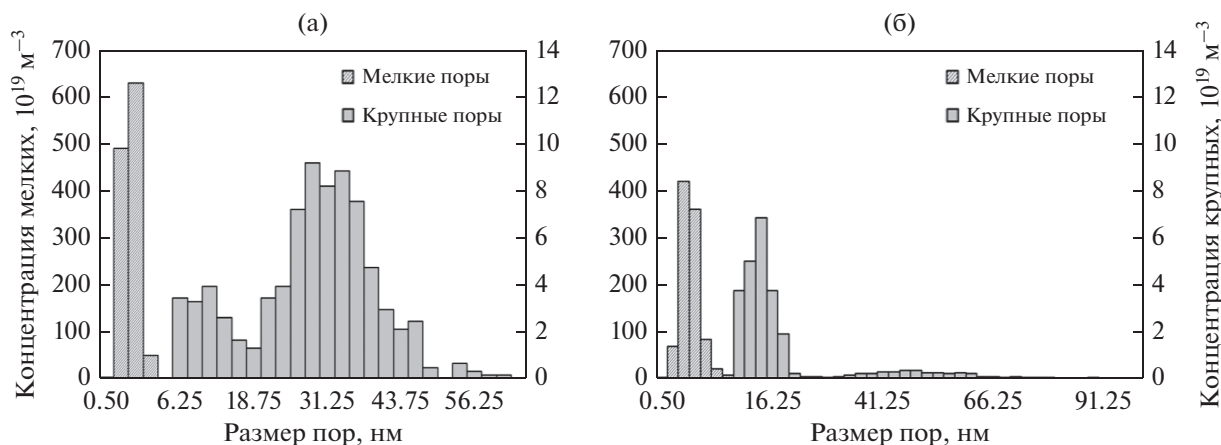


Рис. 3. Гистограммы распределения пор по размерам в образцах из стали ЭК164, облученных дозой: а – 88 сна при 721 К; б – 64 сна при 817 К. Шаг гистограммы в интервале 0–5 нм равен 1 нм, далее – 2.5 нм.

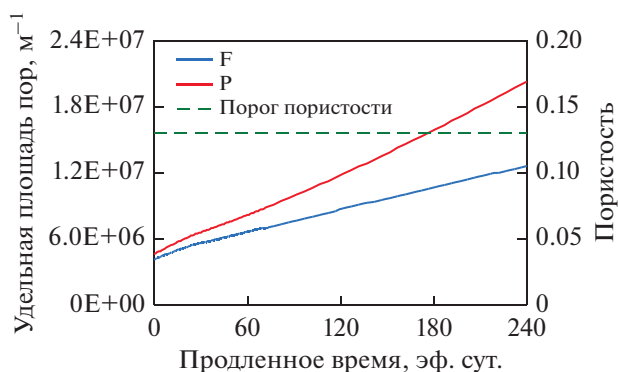


Рис. 4. Зависимость пористости и удельной площади поверхности пор от времени продленного ресурса для образца оболочки из стали ЭК164, облученного до дозы 99 сна при 775 К.

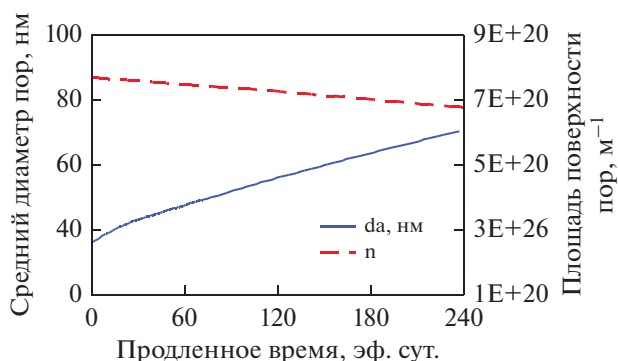


Рис. 5. Зависимость концентрации и среднего диаметра пор от времени продленного ресурса для образца оболочки из стали ЭК164, облученного до дозы 99 сна при 775 К.

распухания. Точка пересечения графика пористости с порогом пористости 0.13, соответствующим распуханию 15%, означает исчерпание ресурса. Интегральная площадь поверхности пор также возрастает со временем, но темпы ее роста замедляются.

Концентрация пор медленно уменьшается из-за коалесценции, а средний диаметр растет, рис. 5.

На всех исследованных образцах была рассчитана повреждающая доза, при которой при продлении эксплуатации образец достиг бы распухания.

Таблица 3. Характеристики пористости в образцах стали ЭК164-ИД после облучения в реакторе БН-600

№ образца	Температура облучения $T$ , К	Средний размер пор ( $d$ ), нм	Средняя концентрация пор ( $n$ ), $10^{20} \text{ м}^{-3}$	Интегральная площ. поверхности пор ( $F$ ), $10^6 \text{ м}^{-1}$	Пористость ( $P$ ), %
1	721	28.0	8.0	2.32	1.4
2	755	27.7	9.3	3.86	3.5
3	775	35.6	7.7	4.09	3.9
4	787	40.0	5.4	3.96	4.5
5	817	17.8	2.5	0.37	0.3

**Таблица 4.** Ресурс достижения распухания 15% для исследованных образцов при продлении эксплуатации

Образец	Набранная доза, сна	Доза достижения $S = 15\%$ , сна	Максимальная доза на твэле, сна
1	88	118	133
2	99	120	120
3	99	119	119
4	96	116	120
5	64	97	150

ния 15%, а также соответствующая ей величина максимальной дозы на твэле. Эти результаты приведены в табл. 4.

Определяющим ресурс твэла по распуханию оболочки оказался участок с максимальной дозой, с температурой облучения 775 К (502°C) и скоростью смещений  $1.30 \times 10^{-6}$  сна/с.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана модель заключительного этапа стадии нестационарного распухания, использующая ранее развитую модель миграции точечных дефектов и метод определения критического диаметра вакансионного зародыша пор.

Сформулирован критерий достижения заключительного этапа стадии нестационарного распухания по гистограмме распределения пор по размерам в образцах после нейтронного облучения.

Определен набор характеристик радиационной пористости, достаточный для количественного описания процесса распухания оболочек твэлов, при продлении их эксплуатации.

Проведены структурные исследования образцов оболочек твэла из стали ЭК164 после эксплуатации в реакторе БН-600 до достижения максимальной повреждающей дозы 99 сна.

С использованием разработанной модели и измеренных экспериментально характеристик радиационной пористости определен остаточный ресурс исследованного твэла по критерию 15% предельного распухания.

Показано, что исследованный твэл с оболочкой из стали ЭК164, изготовленной по усовершенствованной технологии, допускает эксплуатацию до достижения максимальной повреждающей дозы 119 сна.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Garner F.A., Toloczko M.B., Sencer B.N.* Comparison of swelling and irradiation creep behavior of fcc-austenitic / martensitic alloys at high neutron exposure // *J. Nuclear Mater.* 2000. V. 276. P. 123–142.
2. *Tselishchev A.V., Ageev V.S., Budanov Yu. P., Mitrophanova N.M., Leonteva-Smirnova M.V.* Designing a structural steel for fuel elements and fuel assembles of fast sodium reactors. // *Atom. Energiya.* 2010. V. 108 (4). P. 217–221.
3. *Залужный А.Г., Сокурский Ю.Н., Тебус В.Н.* Гелий в реакторных материалах. Энергоатомиздат. 1988. 268 с.
4. *Walst C.A., Yuan J., Brown L.M.* A procedure for measuring the helium density and pressure in nanometre-sized bubbles in irradiated materials using electron-energy-loss spectroscopy // *Philosoph. Magazine A.* 2000. V. 80. № 7. P. 1507–1543.
5. *Козлов А.В., Портных И.А., Блохин А.И., Блохин Д.А., Демин Н.А.* Зависимость критического диаметра пор в аустенитной стали ЧС-68 от температуры нейтронного облучения в модели образования гелий-вакансионных пузырьков // *Физика и химия обр. материалов.* 2012. № 1. С. 16–22.
6. *Козлов А.В., Портных И.А.* Зависимость скорости роста вакансионных пор на начальном этапе стадии нестационарного распухания от характеристик нейтронного облучения // *Металлы.* 2019. № 2. С. 78–85.
7. *Dahl R.E., Jr., Beeler J.R., Jr., Bourquin R.D.* A computer simulation study of grain boundaries in FCC gamma-iron and their interactions with point defects. *Interatom. Potent. and simul. lattice defects.* Battelle Inst. Mater. Sci. Collog., Seattle, Wash. Harrison Hot Springs, 1971. London. 1972. P. 673–692.
8. *Johnson R.A.* Calculations of small vacancy and interstitial clusters for an FCC lattice. // *Phys. Rev.* 1966. V. 152. № 2. P. 629–634.
9. *Козлов А.В., Портных И.А., Асипцов О.И.* Энергия миграции вакансий в сталях и сплавах // *ФММ.* 2019. Т. 120. № 11. С. 1229–1232.