

**Овчинников Илья Игоревич**

OvchinnikovIlyaIgorovich

Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.

Доцент / docent

E-Mail: [bridgeart@mail.ru](mailto:bridgeart@mail.ru)

**Овчинников Игорь Георгиевич**

OvchinnikovIgorGeorgievich

Пермский национальный исследовательский политехнический университет

Профессор / professor

E-Mail: [bridgesar@mail.ru](mailto:bridgesar@mail.ru)

**Богина Маргарита Юрьевна**

BoginaMargaritaYurievna

Балашовский институт (филиал)

Саратовского государственного университета имени Н.Г. Чернышевского

Аспирант / aspirant

E-Mail: [Boginam@mail.ru](mailto:Boginam@mail.ru)

05.23.17 Строительная механика

## **Моделирование деформирования и разрушения материалов в условиях радиационного облучения с учетом влияния вида напряженного состояния**

### **Сообщение 1. Об учете влияния радиационного облучения при построении моделей деформирования в радиационных условиях с применением теории структурных параметров**

Modeling of deformation and destruction of materials in the conditions of radiation exposure taking into account influence of a type of a tension

Message 1. About taking note of radiation exposure at creation of models of deformation in radiation conditions with application of the theory of structural parameters

**Аннотация:** Рассматриваются особенности методологии построения моделей деформирования и разрушения материалов в условиях радиационного облучения с использованием теории структурных параметров Ю.Н. Работнова. Приводятся модели, описывающие изменение дозы облучения (флюенса) нейтронного потока по объему конструктивного элемента, а также модели, описывающие радиационные деформации (распухание) материала. Анализируются результаты экспериментов по влиянию типа и вида напряженного состояния на радиационное распухание и ползучесть материалов.

**The Abstract:** Features of methodology of creation of models of deformation and destruction of materials in the conditions of radiation exposure with use of the theory of structural parameters of Yu.N.Rabotnov are considered. The models describing change of a dose of radiation (fluence) of a neutron stream on volume of a constructive element, and also the models describing radiation deformations (swelling) of a material are given. Results of experiments on influence of type and type of a tension on radiation swelling and creep of materials are analyzed.

**Ключевые слова:** Модели деформирования, радиационное облучение, флюенс нейтронов, радиационное распухание, ползучесть, напряженное состояние.

**Keywords:** Deformation models, radiation exposure, fluence of neutrons, radiation swelling, creep, tension.

\*\*\*

## Введение

Моделирование поведения и прогнозирования работоспособности конструкций из аустенитных сталей в условиях радиационного облучения представляет собой важную, но сложную задачу в силу необходимости учёта различных факторов. В число этих факторов входит необходимость учета влияния радиации на процессы ползучести и накопления повреждений, учета влияния радиационного распухания на деформирование и разрушение материалов и конструкций из них. Проблеме исследования металлических материалов в радиационных полях посвящено много работ, в том числе такие, как [1-6].

Интересная трактовка современного положения дел в области анализа работоспособности элементов, подвергаемых нейтронному облучению, дана в работе [6], где сказано: «...В основном документе, включающем в себя информацию по служебным характеристикам материала и методам расчета на прочность «Нормы расчета на прочность (ПНАЭ Г-7-002-86)» отсутствуют данные по длительной прочности и пластичности материала, подвергающегося нейтронному облучению...Учет нейтронного облучения сводится к введению коэффициентов, уменьшающих поперечную расчетную долговечность. Величины этих коэффициентов были получены из так называемых пост-реакторных испытаний: в начале образец облучался, а потом облученный образец нагружался и определялась его длительная прочность. Реально материал нагружается и облучается одновременно. Накопление повреждений в этом случае может происходить более интенсивно...». Там же отмечается, что устаревшее понятие о том, что прочной должна считаться конструкция, которая может выдержать наибольшую нагрузку, неверно, особенно когда это касается конструкций, предназначенных для длительной эксплуатации и работающих под действием не только нагрузок, но и физических полей. Для таких сложных случаев следует уточнить понятие прочности, используя термин, обозначающий противоположный процесс – процесс разрушения. То есть при моделировании поведения конструкций в условиях радиационного воздействия необходимо рассматривать и процесс деформирования, и процесс разрушения с учетом влияния радиационных сред на механические характеристики и влияния напряженного и поврежденного состояния конструкций на кинетику радиационного воздействия.

Систематизированный обзор экспериментальных данных по влиянию радиационных сред на механические характеристики материалов приведен в статье [7].

Согласно А.П. Филину [8] построение математических моделей, описывающих поведение конструкций с учётом воздействия внешних факторов, в том числе радиационных, может производиться в следующей последовательности:

- выбираются параметры, характеризующие состояние материала конструкции в процессе деформирования и разрушения, а также параметры, которые характеризуют внешние воздействия – нагрузку, температурное воздействие, факторы радиационного воздействия;
- строятся уравнения состояния, то есть соотношения, связывающие характеристики процессов деформирования и разрушения с остальными параметрами; строятся

кинетические уравнения, описывающие изменение этих параметров, которые характеризуют воздействие нагрузки, температуры, радиационной среды; формулируется условие локального разрушения (например, достижение параметром некоторого критического значения);

- формулируются условия проведения экспериментов, используя результаты которых можно провести идентификацию моделей, то есть можно с использованием результатов эксперимента определить коэффициенты моделей так, чтобы эти модели достаточно корректно описывали экспериментальное поле данных;
- формулируется краевая задача, которая позволяет описать процесс деформирования и разрушения конструктивных элементов в заданных условиях (то есть на этом этапе выводятся уравнения толстостенных, тонкостенных цилиндрических оболочек, балок, стержней, пластинок, которые учитывают и свойства материала, из которого сделан конструктивный элемент и внешние факторы, которые действуют на материал через границы элемента);
- проводятся численные эксперименты и исследуется поведение материалов и конструктивных элементов при различных комбинациях внешних факторов (нагрузка, радиационная среда, температура);
- производится проверка моделей путём сопоставления результатов расчёта, полученных с использованием моделей, с другими экспериментальными данными.

Построение математической модели, описывающей деформирование и разрушение материалов с учётом действия радиационной среды начинается с анализа расчётной физической модели, в которой учитываются основные и не учитываются все второстепенные факторы. Анализ экспериментальных данных [7] позволяет свести процесс взаимодействия деформируемого материала с радиационной средой к следующей схеме. Под действием нагрузки и радиационной среды в материале конструктивного элемента развиваются два взаимосвязанных процесса – деформирование и разрушение, причём деформирование может происходить как за счёт ползучести материала, так и за счёт роста дефектов и других повреждений, которые оказывают влияние на механические свойства материалов.

Под влиянием радиационной среды по объёму конструктивного элемента по некоторому закону распределяется доза облучения, которая приводит к изменению кратковременных и длительных механических характеристик и к радиационному распуханию. В результате изменяется процесс деформирования конструкции и кинетика её разрушения.

Описанная схема процессов, происходящих в конструктивном элементе, подвергающемся воздействию радиационной среды, может быть усложнена дополнительным учётом некоторых эффектов, сопровождающих это взаимодействие тела с радиационной средой. Например, это может быть дополнительное влияние вида и уровня напряжённого состояния, которое может либо усиливать, либо уменьшать эффекты радиационного воздействия и радиационного распухания.

При использовании теории структурных параметров Ю.Н. Работнова математическая модель процесса деформирования и разрушения будет включать и известные механические параметры (напряжение, деформацию, поврежденность), и дополнительные структурные параметры, учитывающие воздействие радиационных факторов и радиационного распухания. Для этих структурных параметров формулируются кинетические уравнения, задающие законы их изменения под влиянием напряжённого состояния, истории нагружения, внешних воздействий. Если структурным параметрам придать определенный физический смысл, то кинетические уравнения для них можно формулировать более обоснованно. Как

известно, в механике деформируемого твердого тела для описания процессов деформирования обычно используется система параметров, включающая напряжение  $\sigma$ , деформацию  $\varepsilon$ , температуру  $T$ , время  $t$ . При описании процесса деформирования и разрушения в радиационных условиях эта система оказывается недостаточно полной. Поэтому в дополнение к приведенным выше параметрам вводится параметр поврежденности  $\Pi$ , параметр радиационного распухания  $\varepsilon_\phi$ , параметр – доза нейтронного облучения  $\Phi$ . В общем случае обобщенная модель деформирования и разрушения материала в радиационной среде включает модель конструктивного элемента, модель нагружения, модель деформирования и разрушения с учетом эффектов радиационного воздействия, модель внешних воздействий, включающую модель изменения дозы облучения (флюенса) по объему конструкции и модель, описывающую изменение радиационных деформаций.

Для того, чтобы построить модели, описывающие изменение параметра дозы облучения, сначала проанализируем известные подходы к заданию параметра  $\Phi$  и закона его изменения.

В классической монографии [9] рассматривалось однородное изотропное тело, занимающее полупространство  $z \geq 0$ . В предположении, что на границу  $z=0$  параллельно оси  $z$  падают нейтроны с одинаковой средней энергией и интенсивностью  $I_0$  нейтрон/(см<sup>2</sup>сек), для нахождения интенсивности потока нейтронов, доходящих до плоскости  $z = \text{const}$  поступали так: полагали, что потока  $dI$  в слое  $dz$  пропорционально  $I(z)$  и  $dz$ , откуда

$$I(z) = I_0 e^{-\mu z}, \quad (1)$$

где  $\mu$  – константа материала (макроскопическое эффективное сечение материала элемента конструкции).

Из (1) при условии, что  $I_0$  не зависит от времени, получали, что к моменту  $t$  через сечение  $z$  пройдет поток:

$$\Phi = t \cdot I(z) = I_0 t e^{-\mu z}. \quad (2)$$

В [10] распределение флюенса нейтронов по толщине предлагалось определять по формуле, описывающей ослабление потока нейтронов при прохождении его через слой материала определенной толщины  $x$ , см:

$$\Phi_x = \Phi_0 e^{-x/\lambda}, \quad (3)$$

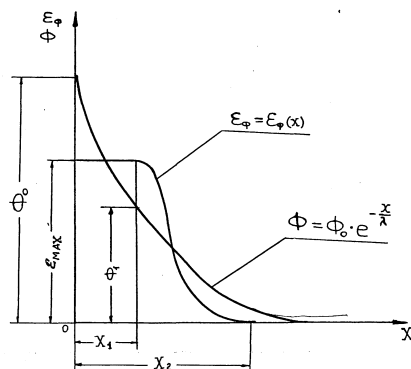
где  $\Phi_0$  – величина начального флюенса нейтронов (нейтрон/см<sup>2</sup>);  $\Phi_x$  – величина флюенса нейтронов за слоем материала толщиной  $x$  (см);  $\lambda$  – длина релаксации нейтронов (длина свободного пробега нейтронов между двумя столкновениями с атомами материала), см.

Обычно флюенс нейтронов на входе в конструкцию имеет максимальное значение  $\Phi_0$  и, потому если  $\Phi_0 > \Phi_I$  ( $\Phi_I$  – минимальная величина флюенса нейтронов), то радиационные деформации в этой области имеют максимальное значение  $\varepsilon_{\max}$ , что иллюстрируется на рис. 1.

При прохождении через толщу материала по мере ослабления флюенса нейтронов радиационные деформации остаются постоянными и равными  $\varepsilon_{\max}$  до тех пор, пока значение флюенса нейтронов не станет менее величины  $\Phi_I$ . Толщина слоя материала  $x_I$ , за которым флюенс нейтронов будет равен  $\Phi_I$ , находится по формуле:

$$x_1 = \lambda \ln \frac{\Phi_0}{\Phi_1} = \lambda [\ln \Phi_0 - \ln \Phi_1]. \quad (4)$$

За слоем материала толщиной  $x_0 > x_1$  флюенс нейтронов продолжает ослабляться в соответствии с (3), а соответствующие ему радиационные деформации уменьшаются по своим зависимостям. Толщина слоя



**Рис. 1.** Изменение радиационных деформаций и флюенса нейтронов по толщине облучаемой конструкции:

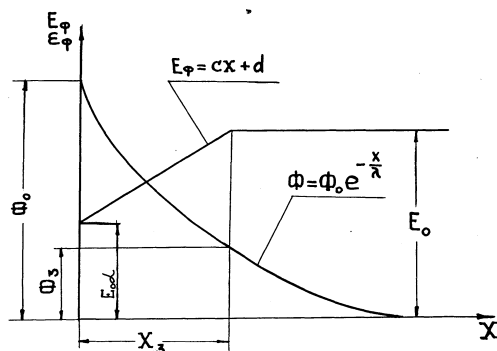
$\epsilon_{max}$  - максимальная величина радиационных деформаций в данном материале;  $\Phi_0$  - флюенс нейтронов на облучаемой поверхности конструкции;  $\Phi_1$  - минимальная величина флюенса нейтронов, при которой радиационные деформации достигают значения  $\epsilon_{max}$ ;  $x_1$  - толщина слоя материала, после прохождения которого флюенс нейтронов ослабляется до величины  $\Phi_1$ .

материала  $x_2$  рис.1, за которым радиационные деформации практически отсутствуют, находится аналогично величине  $x_1$ :

$$\Phi_2 = \Phi_0 e^{-\frac{x_2}{\lambda}},$$

$$x_2 = \lambda \ln \frac{\Phi_0}{\Phi_2} = \lambda [\ln \Phi_0 - \ln \Phi_2]. \quad (5)$$

В [11] отмечается, что при флюенсе нейтронов  $\Phi_2 \approx 10^{18} - 10^{19}$  нейтрон/см<sup>2</sup> и менее радиационные деформации практически не наблюдаются. Распределение модуля упругости по толщине облучаемой конструкции показано на рис. 2.



**Рис. 2.** Изменение модуля упругости и флюенса нейтронов по толщине облучаемой конструкции:

$\Phi_0$  - флюенс нейтронов на облучаемой поверхности конструкции;  $\Phi_3$  - максимальная величина флюенса нейтронов, при которой модуль упругости не изменяется и равен  $E_0$ ;  $X_3$  - толщина слоя конструкции, после прохождения которого флюенс нейтронов ослабляется до величины  $\Phi_3$ .

Оно может быть описано линейной функцией

$$E_\phi = cx + d, \quad (6)$$

где:  $c = E_0 \frac{\alpha_1 \lg e}{\lambda}$ ;  $d = -E_0 [\alpha_1 \lg (\beta_1 \Phi_0) - \gamma]$ ,

$\alpha_1, \beta_1, \gamma$  - константы, зависящие от энергетического спектра нейтронов и гранулометрического состава заполнителя.

Снижение величины модуля упругости начинается при достижении флюенсом значения  $\Phi_3$  на расстоянии  $x_3$  от поверхности конструкции. Это расстояние  $x_3$  можно найти из выражения:

$$x_3 = \lambda [\ln \Phi_0 - \ln \Phi_3]. \quad (7)$$

Как видно, зависимость (6) справедлива в интервале  $0 < x < x_3$ . Вышеприведенные выражения справедливы в случае плоской облучаемой нейтронами поверхности. Если потоком нейтронов, распределенных по внутренней поверхности, облучается внутренняя поверхность пустотелого кругового цилиндра, то распределение флюенса нейтронов по толщине конструкции будет описываться выражением:

$$\Phi_r = \Phi_0 \frac{r_e}{r} e^{-\frac{r-r_e}{\lambda}} = \Phi_0 \frac{r_e}{r} \exp[-(r-r_e)/\lambda], \quad (8)$$

где  $r_e$  - внутренний радиус цилиндра;  $r$  - координата точки, для которой находится значение флюенса нейтронов.

Выражение для закона изменения модуля упругости в этом случае примет вид:

$$E_\phi = cr + d_1 - \alpha_1 \lg \frac{r_e}{r}, \quad (9)$$

где  $d_1 = E_0 \left[ \gamma - \frac{r_e \alpha_1}{\lambda} \lg e - \alpha_1 \lg \beta_1 \Phi_0 \right]$ ; остальные величины определены ранее.

В [12] отмечается, что для решения задачи о распределении флюенса нейтронов в конструкции может использоваться диффузионное приближение. Для случая отсутствия

ядерных реакций в теле облучаемой конструкции (нет источника генерации нейтронов) дифференциальное уравнение, задающее закон распределения флюенса, записывается в виде:

$$\nabla^2 \Phi - \frac{\Phi}{L} = 0, \quad (10)$$

где  $L$  – длина диффузии, зависящая от энергии нейтронов.

1.1. Если поток нейтронов действует на полупространство, то решение этого уравнения примет вид:

$$\Phi(x, y, z) = \Phi_0 \exp\left(-\frac{(h/2) - z}{L}\right), \quad (11)$$

$\Phi_0$  - значение флюенса нейтронов на поверхности полупространства.

Радиационные деформации  $\varepsilon_\phi$  могут быть заданы моделью вида

$$\varepsilon_\phi = \begin{cases} 0, & \Phi < \Phi_{2нор} \\ \delta \cdot \varepsilon_{\max} \left[ \exp(v \cdot (\Phi - \Phi_{2нор})) - 1 \right] / \left[ \varepsilon_{\max} + \delta \exp(v \cdot (\Phi - \Phi_{2нор})) \right], & \Phi \geq \Phi_{2нор} \end{cases} \quad (12)$$

где  $\varepsilon_{\max}$  - максимальное значение радиационных деформаций для материала,  $\delta, v$  - эмпирические коэффициенты, зависящие от радиационной деформативности материала и энергетического спектра потока нейтронов.

В [13] предложено использовать следующую зависимость для описания радиационного распухания (объемное деформирование) сталей также:

$$\varepsilon_\phi = A \cdot (kt)^{n(T)} f(T), \quad (14)$$

где  $f(T)$  и  $n(T)$  - функции температуры,  $kt$  - уровень радиационных повреждений (или флюенс нейтронов),  $A$  - коэффициент.

Степенная зависимость распухания материала (стали) от дозы нейтронного облучения предложена в [14]:

$$\varepsilon_\phi = A \cdot (I \cdot t)^m + B, \quad (16)$$

где  $A$  и  $m$  — параметры, зависящие от температуры;  $B$  — функция флюенса нейтронов и температуры;  $I$  - интенсивность нейтронного потока;  $(I \cdot t) = \Phi$  - доза нейтронного облучения.

В статье [15] распухание сталей марок 304 и 316 предложено моделировать функцией:

$$\varepsilon_\phi = 4,9 \cdot 10^{-49} (I \cdot t)^{1,71} \cdot 10^{\frac{1,549 \cdot 10^4}{T} - \frac{5,98 \cdot 10^6}{T^2}}, \quad (17)$$

Кинетику распухания стали ОХ16Н15МЗБ предложено описывать выражением [16]:

$$\varepsilon_\phi = 5,33 \cdot 10^{-7} (\alpha kt)^{0,19+1,63 \cdot 10^{-3} T} \exp\left(0,0235T - \frac{8,35}{T-630} - \frac{17,82 \cdot 10^2}{980-T}\right), \quad (18)$$

где  $kt$  - число смещений атомов, соответствующих данному флюенсу нейтронов;  $\alpha$  - коэффициент, зависящий от выбора модели для расчета  $kt$ .

В. Н. Быковым предложена эмпирическая зависимость распухания стали ОХ16Н15МЗБ от дозы и температуры облучения [26]:

$$\varepsilon_\phi = I_{\max}^{1,665} t^{2,096} \exp(I/I_{\max})^7 f(T), \quad (19)$$

где  $f(T) = 0,04123 - 5,87 \times 10^5 (T - 417,5) + 1,742 \times 10^{-4} (T - 427)^{1,787}$ , если  $T > 427$ .

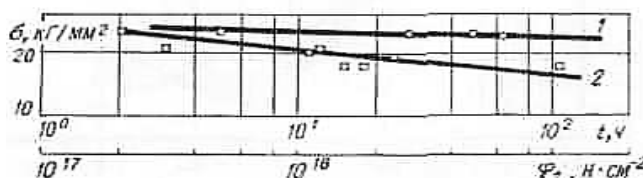
В [17] было получено уравнение, описывающее распухание стали X18N10T, в широком интервале температур, доз и скоростей создания смещений. Эмпирическая зависимость распухания этой стали от дозы, температуры облучения и скорости создания смещений имеет вид [18]:

$$S(k, D, T) = R(k)\phi(D - D_o(k, T))\exp[-(T - T_{max}(k))^2 / 2\sigma_T^2(k)] \quad (20)$$

где  $S(k, D, T)$  - распухание, %;  $D$  - повреждающая доза, сна;  $T$  - температура облучения, °С;  $k$  - скорость создания смещений, сна/с;  $\phi(x) = x * \Theta(x)$  и  $\Theta(x)$  - есть единичная ступенчатая функция Хевисайда:  $\Theta(x) = 1$ ,  $x > 0$  или  $0$ ,  $x < 0$ ;  $R(k) = r_o - r_k \ln k$  - скорость распухания на стационарной стадии, %/сна;  $D_o(k, T) = d_o - d_T T + d_k \ln k$  - инкубационный период, сна;  $T_{max}(k) = T_o + T_k \ln k$  - температура максимумараспухания, °С;  $\sigma_T(k) = \sigma_o + \sigma_k \ln k$  - дисперсия температуры, °С. Параметры, входящие в выражение (20) имеют следующие значения:  $r_o = 0,25 \pm 0,05$ ;  $r_k = 0,022 \pm 0,005$ ;  $d_o = 103,0 \pm 0,2$ ;  $d_T = 0,101 \pm 0,004$ ;  $d_k = 2,61 \pm 0,03$ ;  $T_o = 690,0 \pm 1,3$ ;  $T_k = 15,5 \pm 0,1$ ;  $\sigma_o = 12,3 \pm 0,5$ ;  $\sigma_k = 1,9 \pm 0,1$ .

Предварительные соображения позволяют предположить, что не только уровень, но и вид напряженного состояния должен оказывать влияние на кинетику изменения длительной прочности сталей в условиях радиационного облучения. Однако в связи с большими трудностями постановки соответствующих экспериментов, экспериментальных данных, посвященных исследованию влияния вида напряжённого состояния на ползучесть и длительную прочность стали в условиях радиационного (реакторного) облучения недостаточно. Ниже рассмотрим некоторые результаты исследований или информацию о них.

В работе [4] отмечается влияние уровня напряжений на эффект радиационного воздействия на длительную прочность стали ОХ16Н15МЗБ при температуре 675°С. Сравнение результатов испытаний при одноосном растяжении, приведенных на рисунке 3 в обычных условиях (линия 1) и в условиях облучения (линия 2), показывает, что облучение существенным образом снижает долговечность стали, но при этом при меньших уровнях напряжений влияние радиационного облучения проявляется значительнее.



**Рис. 3.** Кривые длительной прочности стали ОХ16Н15МЗБ

в обычных (1) и радиационных (2) условиях нагружения

при  $T = 675^\circ\text{C}$  и интенсивности потока  $= 3,7 \times 10^{14} \text{ нсм}^{-2} \text{ сек}^{-1}$ ,  $E \geq 0,85 \text{ Мэв}$

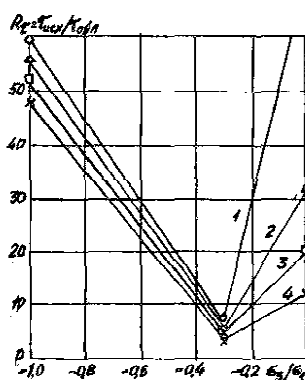
Влияние растягивающих напряжений на радиационную ползучесть и радиационное распухание исследовалось и в России [19-21] и за рубежом. Однако значительный интерес представляет также исследование влияния сжимающих напряжений на эти же характеристики с целью проверки сохранности существующих закономерностей и зависимости радиационной ползучести от типа напряжений. Авторами [22] исследовалось влияние сжимающих и растягивающих напряжений на радиационное распухание и деформацию ползучести в сталях X18N10T. В оболочках облучаемых образцов при температуре 420-450 С создавались сжимающие, растягивающие напряжения и одновременно облучались образцы, в которых эти напряжения практически отсутствовали. Проведено сравнение влияния сжимающих, растягивающих и «нулевых» напряжений на распухание и ползучесть стали 08X18N10T.



Более детальное обсуждение проблемы содержится в статье [23], в которой отмечается, что вопрос о влиянии сжимающих напряжений на распухание был исследован в работе [24], в которой рассматривались результаты эксперимента с облучением изогнутых пластин из стали 316ХД в реакторе ЕВРИИ при температурах облучения от 412 до 458°C в интервале повреждающих доз от 39 до 75 сна. Образцы вырезались из областей с растягивающими и сжимающими напряжениями, а также из области с нулевыми напряжениями. В эксперименте показано, что и сжимающие и растягивающие напряжения при низких температурах облучения действуют практически одинаково на параметры при температуре облучения 420–423°C и дозах 39 и 75 сна. При более высоких температурах облучения эффект влияния напряжений на величину распухания оставался.

Проведенные авторами статьи [23] эксперименты при температурах облучения около 400°C и повреждающих дозах 15 сна подтвердили данные предыдущего американского эксперимента.

В то же время на рисунке 4 изображён график, показывающий изменение долговечности стали ОХ16Н15МЗБ для различных видов напряженных состояний [4].



**Рис. 4.** Изменение долговечности стали ОХ16Н15МЗБ при различных видах напряженного состояния в условиях радиационного облучения: 1 -  $\sigma_i = 22,7 \text{ кГ/мм}^2$ ; 2 -  $\sigma_i = 23,0 \text{ кГ/мм}^2$ ; 3 -  $\sigma_i = 23,3 \text{ кГ/мм}^2$ ; 4 —  $\sigma_i = 23,5 \text{ кГ/мм}^2$

Различное влияние реакторного облучения стали на ее длительную прочность при разных видах напряженного состояния особенно отчетливо проявляется при анализе экспериментальной зависимости между отношением  $\tau_{исх}/\tau_{обл}$  ( $\tau_{исх}$  и  $\tau_{обл}$  соответственно долговечность необлученной и облученной стали) и соотношением главных напряжений  $\sigma_3/\sigma_1$ . Как видно, из рисунка 4, для различных видов напряженных состояний соотношение  $\tau_{исх}/\tau_{обл}$  в исследованном диапазоне напряжений не постоянно, а изменяется довольно сложным образом.

Эти данные свидетельствуют о весьма существенном влиянии вида напряженного состояния на длительную прочность стали при внутриреакторном облучении. Поэтому указанный эффект должен учитываться при построении моделей деформирования и разрушения элементов конструкций находящихся в сложном напряженном состоянии в условиях облучения.

**Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 12-01-31130Мол\_а по теме «Нелинейные модели деформирования и методы определения долговечности элементов конструкций, взаимодействующих с агрессивными средами и полями».**

## ЛИТЕРАТУРА

1. Gary S. Was Fundamentals of Radiation/ Materials Science Metals and Alloys. Springer-Verla. Berlin – Heidelberg. 2007, 827 p.
2. Киселевский В.Н. Изменение механических свойств сталей и сплавов при радиационном облучении. Киев. 1977. 104 с.
3. Тутнов А.А. Радиационные эффекты изменения механических свойств конструкционных материалов и методы их исследования. Киев. Наукова Думка. 1977. 78 с.
4. Писаренко Г.С. Прочность материалов и элементов конструкций в экстремальных условиях. Киев. Наукова Думка. 1980. 531 с.
5. Бескоровайный Н.М., Калинин Б.А., Платонов П.А., Чернов И.И. Конструкционные материалы ядерных реакторов. М.: Энергоатомиздат. 1995. 704 с.
6. Карзов Г.П. Обеспечение радиационной прочности корпусов и внутрикорпусных устройств АЭС с ВВЭР // Безопасность, эффективность и экономика атомной энергетики. Пленарные и секционные доклады 7 международной научно-технической конференции. М.: ОАО «Концерн Росэнергоатом». 2010. С. 32-35.
7. Овчинников И.И., Овчинников И.Г., Богина М.Ю., Матора А.В. Влияние радиационных сред на механические характеристики материалов и поведение конструкций (обзор) // Интернет – журнал «Науковедение». 2012. №4. С. 1-39.
8. Филин А.П. Прикладная механика твёрдого деформируемого тела, т. 1. – М.: Наука, 1975. – 832с.
9. Огибалов П.М., Колтунов М.А. Оболочки и пластины Издательство Московского университета. 1969. 695с.
10. Комаровский А.Н. Строительство ядерных установок. – М.: 1969. 275с
11. Дубровский В. Б. Радиационная стойкость строительных материалов. – М.: Стройиздат, 1977. – 278с.
12. Андреев В.И. Некоторые задачи и методы механики неоднородных тел: Монография - М.: Издательство АСВ, 2002. – 288с.
13. Забудько Л.М., Лихачев Ю.И., Прошкин А.А. Работоспособность ТВС быстрых реакторов // Физика и техника ядерных реакторов - М.: Энергоатомиздат, 1988, №35. - 168 с.
14. Bates J., Straalsand J. An empirical representation of irradiation induced swelling of solution treated type 304 stainless steel. — Nuclear Technology, 1972, vol. 14. N 3. – p. 292-298
15. Helbling W. Deformation of fuel element boxes gas-cooled fast breeder reactors due to neutron irradiation induced swelling of steel.—Nuclear Engineering and Design, 1971, vol. 16, N 1. – p. 59 -66.
16. Дюпуи Д. М. Свойства материалов, облученных в реакторе RAPSODIE // Топливо и твэлы для быстрых реакторов.— М.: Атомиздат, 1975, вып. 5, - с.39 -46.
17. Быков В. Н. Эмпирическая зависимость распухания стали ОХ16Н15МЗБ от дозы и температуры облучения// Атомная энергия, 1976, т. 40, вып. 4, с. 293-295.
18. Кальченко А.С., Брык В.В., Воеводин В.Н., Лазарев Н.П. Прогнозирование радиационного распухания выгородки реактора DD”Н-1000 на период эксплуатации 30-60 лет// Ядерная физика та енергетика, 2011, т.12, №1, с. 69-78

19. Neustroev V.S., Shamardin V.K. Radiation Creep and Swelling of Austenitic 16Cr-15Ni-3Mo-Nb Steel Irradiated in the Reactor BOR-60 at 350 and 420°C // Effects of Radiation on Materials: 16th International Symposium, ASTM STP 1175, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1993. P.816-823

20. Неустроев В.С., Шамардин В.К., Ожигов Л.С. Радиационная ползучесть и набухание аустенитных сталей, облученных в реакторе БОР60 при температурах 350–420°C // Вопросы атомной науки и техники. Сер.: Физика радиационных повреждений и реакторное материаловедение. 1996. Вып. 1(64). С. 34–38.

21. Неустроев В.С., Островский З.Е., Шамардин В.К. Влияние напряжений на радиационное набухание и параметры вакансионной пористости облученных нейтронами аустенитных сталей // ФММ. 1998. Т. 86. Вып. 1. С. 115–125.

22. Макаров Е.И., Неустроев В.С., Белозеров С.В., Островский З.Е. Влияние сжимающих и растягивающих напряжений на радиационное набухание и деформацию ползучести в аустенитных сталях X18N10T // Радиационная физика металлов и сплавов. Тезисы докладов 9 международного уральского семинара. Россия. Кыштым. 2011. с.36

23. Неустроев В.С., Белозеров С.В., Макаров Е.И., Островский З.Е. Влияние растягивающих и сжимающих напряжений на радиационное набухание и деформацию ползучести аустенитной стали X18N10T // Физика металлов и материаловедение, 2010, том 110, № 4, с. 412–416

24. Lauritzen Thor, Vaidyanathan S., Bell W.L., Yang W.J.S. Irradiation Induced Swelling in AISI 316 Steel: Effect of Tensile and Compressive Stresses / Radiation Induced Changes in Microstructure : 13th International Symposium (Part 1), ASTM STP 955. F.A. Garner, N.H. Packan, Eds., American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1987. P. 101–113.

**Рецензент:** Петров Владилен Васильевич, заведующий кафедрой «Теория сооружений и строительных конструкций» Саратовского государственного технического университета им. Гагарина Ю.А., академик РААСН, д-р.техн. наук, профессор