

РАСЧЕТ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ И ДОЛГОВЕЧНОСТИ ИЗГИБАЕМОГО ЭЛЕМЕНТА С УЧЕТОМ ВЛИЯНИЯ РАДИАЦИОННОЙ СРЕДЫ

© 2018 Р.Б. Гарибов*, И.Г. Овчинников***

* Балаковский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», Балаково, Саратовская обл., Россия

** Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

Рассматривается задача расчетного моделирования поведения изгибаемого конструктивного элемента (балки) подвергающейся совместному действию изгибающего момента и радиационному облучению. Приведены основные уравнения модели, учитывающие процесс накопления повреждений и влияния облучения. С использованием экспериментальных данных на основе метода наименьших квадратов выполнена идентификация модели, то есть определены значения коэффициентов. Проведено сопоставление результатов расчета с помощью найденных коэффициентов с экспериментальными данными, показавшее хорошее совпадение результатов. Затем с использованием приведенных уравнений с найденными значениями коэффициентов выполнено численно моделирование поведения облученной балки, нагруженной моментом. Исследовано влияние облучения на кинетику изменения кривизны, приведены эпюры напряжений и повреждений по сечению балки в разные моменты времени. Рекомендовано для повышения точности результатов моделирования при идентификации моделей использовать не только экспериментальные данные по длительной прочности и длительной пластичности, но и кривые ползучести.

Ключевые слова: радиация, радиационное воздействие, моделирование, флюенс, долговечность, изгибаемый элемент, балка.

Поступила в редакцию: 24.05.2018

ВВЕДЕНИЕ

Известно, что под влиянием радиационной среды изменяются механические свойства материалов (бетонов, сталей), ускоряются процессы деформирования и разрушения. Результаты экспериментальных исследований воздействия радиационных сред на металлические, бетонные, полимербетонные, железобетонные конструкции приведены в работах [1–6]. Вопросам расчета конструкций в условиях воздействия радиационных сред посвящены исследования [7–15], а обзор моделей и методов, используемых при расчете и моделировании поведения конструкций, подвергающихся воздействию радиационных сред приведен в [16].

Г.П. Карзовым в работе докладе «Обеспечение радиационной прочности корпусов и внутрикорпусных устройств атомных реакторов АЭС с ВВЭР» было введено понятие «радиационная прочность», то есть «способность материала конструкции противостоять возникновению и развитию разрушения в процессе эксплуатации в условиях воздействия на материал радиационного облучения». Основным показателем радиационной прочности считается срок безопасной эксплуатации конструктивного элемента, причем этот срок является хотя и косвенной, но единственной оценкой, ибо реальный срок безопасной эксплуатации конструкций не определяется прямыми экспериментами. Г.П. Карзовым сформулированы задачи создания методики расчета прочности конструкций атомных реакторов, в том числе: расчет напряженно-деформированного состояния элементов при совместном действии силовых и температурных полей с учетом радиационного облучения; формулировка условий наступления предельного состояния конструктивных элементов; разработка методик расчета повреждаемости элементов конструкций при статическом и циклическом нагружении. Т.е. одним из основных направлений

исследовательских работ является разработка и совершенствование методик расчета повреждаемости материалов и конструкций из них в условиях влияния радиационной среды с целью расчетного обеспечения безопасного срока эксплуатации.

МОДЕЛЬ ДЕФОРМИРОВАНИЯ И РАЗРУШЕНИЯ ИЗГИБАЕМОГО КОНСТРУКТИВНОГО ЭЛЕМЕНТА В УСЛОВИЯХ РАДИАЦИОННОГО ОБЛУЧЕНИЯ И ЕЕ ИДЕНТИФИКАЦИЯ

Построим модель деформирования и разрушения изгибаемого конструктивного элемента с учетом воздействия радиационной среды, вызывающей ускорению процессов деформирования и разрушения материала, трактуемого как накопление повреждений.

Связь между напряжениями σ , полной деформацией ε , поврежденностью Π , флюенсом Φ и радиационным распуханием ε_ϕ примем в виде:

$$\varepsilon(\sigma, \Phi, \Pi) = A(\Phi)\sigma^{\alpha(\Phi)} \cdot \exp[\lambda(\Phi)\Pi] + \varepsilon_\phi, \quad (1)$$

а кинетика изменения поврежденности описывается дифференциальным уравнением:

$$\frac{d\Pi}{dt} = S(\Phi) \left(\frac{\sigma_u}{1-\Pi} \right)^{g(\Phi)}, \quad \Pi(0) = 0, \quad \Pi(t_p) = 1. \quad (2)$$

Здесь использованы обозначения, t – время, $A(\Phi), \alpha(\Phi), \lambda(\Phi), S(\Phi), g(\Phi)$ – коэффициенты, учитывающие влияние флюенса нейтронов. При формулировании уравнений (1) и (2) принято, что влияние радиационного облучения не сказывается на виде уравнений, а приводит только к изменению коэффициентов. Такое допущение широко используется при моделировании процессов деформирования и разрушения [2,3,7,8].

Для момента времени $t=0$, то есть для случая «мгновенного, но статического» нагружения уравнение (1) превращается в степенную зависимость:

$$\varepsilon_{\text{мгн}} = A \cdot \sigma^\alpha. \quad (3)$$

После интегрирования кинетического уравнения (2) для случая постоянных величин коэффициентов и заданного уровня напряжений $\sigma = \sigma_0 = \text{const}$, получается формула для определения поврежденности:

$$\Pi = 1 - \left[1 - S(g+1)\sigma_0^g t \right]^{\frac{1}{g+1}}, \quad (4)$$

из которой при задании предельного значения параметра поврежденности $\Pi=1$, получается уравнение кривой длительной прочности:

$$t_p = 1 / \left[S(g+1)\sigma_0^g \right]. \quad (5)$$

При наличии экспериментальных данных по длительной прочности материала, полученных на необлученных образцах и образцах, облученных до определенной дозы Φ , с помощью метода наименьших квадратов определяются значения коэффициентов S и g по формулам:

$$g = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \ln t_i^* \cdot \sum_{i=1}^N \ln \sigma_i - \sum_{i=1}^N \ln t_i^* \sigma_i \right] / \left[\sum_{i=1}^N (\ln \sigma_i)^2 - \frac{1}{N} \left(\sum_{i=1}^N \ln \sigma_i \right)^2 \right], \quad (6)$$

$$S = \left(\frac{1}{g+1} \right) \exp \left(-\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \ln t_i^* \sigma_i^g \right). \quad (7)$$

Здесь использованы обозначения t_i^* - время до разрушения при напряжении σ_i , i – промежуточная точка на кривой длительной прочности, N – общее количество экспериментальных точек.

После подстановки выражения (4) в формулу (1) получаем выражение для полной деформации, справедливое при постоянном значении напряжения $\sigma = \sigma_0 = \text{const}$:

$$\varepsilon = A \cdot \sigma_0^\alpha \cdot \exp \left\{ \lambda \left[1 - \left(1 - S(g+1)\sigma_0^g t \right)^{\frac{1}{g+1}} \right] \right\}. \quad (8)$$

Если вычесть из полной деформации ε мгновенную деформацию при статическом нагружении (3), то получится выражение для деформации «ползучести», создаваемой накоплением повреждений:

$$p = \varepsilon - \varepsilon_{\text{мгн}} = A \cdot \sigma_0^\alpha \cdot \exp \left\{ \lambda \left[1 - \left(1 - S(g+1)\sigma_0^g t \right)^{\frac{1}{g+1}} \right] - 1 \right\}. \quad (9)$$

Используя выражение (9) для аппроксимации экспериментальных кривых ползучести, полученных при нескольких уровнях напряжений, методом наименьших квадратов можно получить выражение для определения коэффициента λ :

$$\lambda = \left[\sum_{i=1}^M \Pi_i \ln(1 + p_i / (A \cdot \sigma_i^\alpha)) \right] / \left[\sum_{i=1}^M (\Pi_i)^2 \right]. \quad (10)$$

Здесь Π_i, σ_i, t_i - координаты промежуточных точек i на кривых ползучести, $\Pi_i = \Pi(t_i, \sigma_i)$ определяется по (4), M – общее число точек на экспериментальных кривых ползучести.

Величины A и α , входящие в (10) могут быть определены путем аппроксимации зависимостью (3) экспериментальной диаграммы «мгновенного» деформирования материала, что при использовании метода наименьших квадратов дает:

$$A = \exp \left[L \cdot \frac{\left(\sum_{i=1}^L \ln \sigma_i \right)}{L} + \frac{\left(\sum_{i=1}^L \ln \varepsilon_i \right)}{L} \right] \quad (11)$$

$$\alpha = \frac{\sum_{i=1}^L (\ln \sigma_i)(\ln \varepsilon_i) - \frac{\sum_{i=1}^L (\ln \sigma_i)(\ln \varepsilon_i)}{L}}{\left[\frac{\sum_{i=1}^L (\ln \sigma_i)^2}{L} + \sum_{i=1}^L (\ln \sigma_i)^2 \right]} \quad (12)$$

Здесь буквой L обозначено общее число точек на экспериментальной кривой «мгновенного» деформирования материала, i – промежуточные точки на этой кривой.

При наличии экспериментальных данных по длительной пластичности, то есть при наличии экспериментальной зависимости деформации ползучести при разрушении от напряжения при $\Pi=1$, величина λ определяется с помощью выражения, полученного преобразованием формулы (10):

$$\lambda = \frac{1}{R} \left[\sum_{i=1}^R \ln(1 + p_i^* / A \cdot \sigma_i^\alpha) \right]. \quad (13)$$

Здесь p_i^*, σ_i - значения координат точек на экспериментальной кривой длительной пластичности $p^*(\sigma)$, а величина R - общее количество точек на этой экспериментальной кривой. Используя выражение в круглых скобках в (13), получим уравнение кривой длительной пластичности:

$$p^* = A(\exp \lambda - 1)\sigma^\alpha. \quad (14)$$

Полученные формулы были использованы для идентификации приведенной модели деформирования и разрушения с использованием экспериментальных данных для стали ОХ16Н15М3Б [2, 3], то есть для определения коэффициентов модели. Результаты идентификации представлены в таблице 1.

Таблица 1. – Результаты идентификации модели деформирования и разрушения изгибаемого конструктивного элемента (для стали ОХ16Н15М3Б) [The identification results of model of deformation and bent structural element destruction (for ОХ16Н15М3В steel)]

Обозначения коэффициентов	A , МПа	α	λ	S	g
Значения коэффициентов для стали без облучения	5×10^{-6}	1	28,4	$1,1 \times 10^{-47}$	18,21
Значения коэффициентов для стали после облучения	$5,7 \times 10^{-6}$	1	23,06	$1,83 \times 10^{-25}$	9,47

С использованием полученных значений коэффициентов были построены расчетные кривые ползучести (пунктиром) для необлученного (1) и облученного (2) материала, приведенные на рисунке 1. Там же точками показаны экспериментальные значения деформаций ползучести.

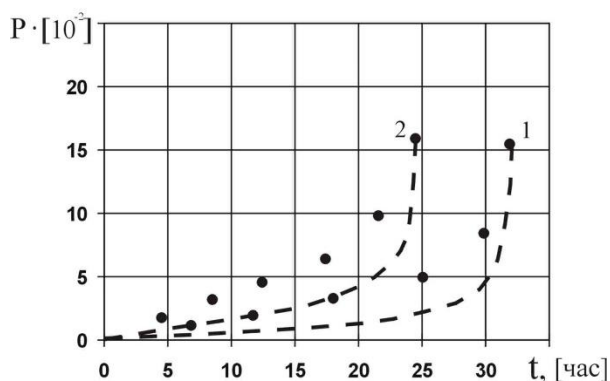


Рис. 1. – Расчетные (пунктиром) и экспериментальные (точками) кривые ползучести облученного (2) и необлученного (1) материала из стали ОХ16Н15М3Б [The calculated (dashed) and experimental (crooked) creep curves of irradiated (2) and unirradiated (1) ОХ16Н15М3В steel material]

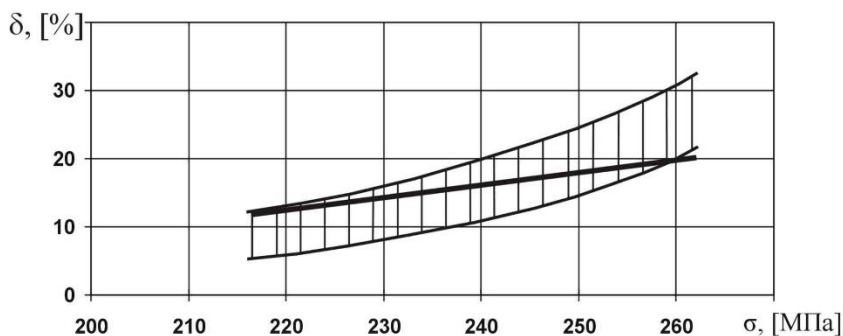


Рис. 2. – Расчётная кривая длительной пластичности для стали ОХ16Н15М3Б и экспериментальный коридор разброса [The calculated curve of long-term ductility for ОХ16Н15М3В steel and the experimental band gap]

Также была построена расчетная кривая длительной пластичности (жирная линия), приведенная на рисунке 2. На этом же рисунке показан коридор разброса экспериментальных данных по длительной пластичности (заштрихованная часть графика). Как видно, имеется достаточно хорошее совпадение кривых ползучести и в облученном и в необлученном состоянии и кривой длительной пластичности с экспериментальными данными. Отличие теоретических кривых ползучести от экспериментальных в средней области аппроксимации вызвано тем, что коэффициенты S, g, λ определялись с использованием экспериментальных данных по длительной прочности и длительной пластичности, то есть по предельным характеристикам и при этом кинетика ползучести на среднем участке не учитывалась.

РАСЧЕТНАЯ ОЦЕНКА ДЛИТЕЛЬНОЙ ПРОЧНОСТИ ИЗГИБАЕМОГО КОНСТРУКТИВНОГО ЭЛЕМЕНТА

Исследуется поведение и длительная прочность балки прямоугольного поперечного сечения размерами $b \times h$, изгибаемой моментом M . Для балки из материала, одинаково работающего на растяжение и сжатие, гипотеза плоских сечений имеет вид:

$$\varepsilon = \chi z, \quad (15)$$

где использованы обозначения ε , - деформация в точке с ординатой z по высоте сечения балки, χ – кривизна балки.

Разрешая уравнение (1) относительно напряжения и учитывая (15), получим следующий закон распределения нормальных напряжений по высоте сечения балки (зависимость коэффициентов от флюенса Φ опущена):

$$\sigma = \left[\frac{\chi \cdot z}{A} \exp(-\lambda \cdot \Pi) \right]^{\frac{1}{\alpha}}. \quad (16)$$

Из-за наличия в показателе степени величины $1/\alpha$, а также зависимости параметра поврежденности $\Pi(z)$ от координаты z напряжения по высоте балки будут распределяться нелинейно. Для случая чистого изгиба, который испытывает балка, внешний момент будет уравниваться внутренним моментом, создаваемым напряжениями:

$$M = \iint_F \sigma_z dF = b \int_{-h/2}^{h/2} \sigma \cdot z dz. \quad (17)$$

В этом уравнении равновесия F – площадь сечения балки, b – ее ширина.

После подстановки выражения для напряжений (16) в это уравнение можно получить следующее выражение для нахождения кривизны балки:

$$\chi = \frac{M \cdot A}{2b} / \left[\int_0^{h/2} z (z \cdot \exp(-\lambda \Pi))^{1/\alpha} dz \right]. \quad (18)$$

Уравнение накопления повреждений (2) с учетом выражения для напряжений (16) примет следующий вид:

$$\frac{d\Pi}{dt} = S \left[\left(\frac{\chi \cdot z}{A} \cdot \exp(-\lambda \Pi) \right)^{1/\alpha} \left(\frac{1}{1 - \Pi} \right) \right]^g, \quad (19)$$

$$\Pi(0) = 0; -\frac{h}{2} \leq z \leq \frac{h}{2}$$

Система уравнений, включающая уравнения (1), (16), (18), (19) и (2.75) позволяет расчетным путем проанализировать кинетику развития напряжений, деформаций, повреждений во времени для разных точек сечения балки при разных условиях облучения.

Приведенные выше уравнения использовались для расчета кинетики деформирования во времени балки сечением $b = 10$ мм, $h = 20$ мм, из Стали ОХ16Н15МЗБ, изгибаемой моментом $M = 2,24 \times 10^5$ МПа·мм³. Результаты расчета приведены на рисунках 3,4,5.

Рисунок 3 иллюстрирует кинетику нарастания кривизны балки для двух случаев – без облучения и после облучения. На рисунке 4 показаны эпюры напряжений на верхней половине высоты сечения балки для разных моментов времени. На рисунке 5 приведены эпюры повреждений также по высоте верхней половины сечения балки после облучения флюенсом $\Phi = 5,5 \times 10^{12}$ нейтрон/см² для разных моментов времени.

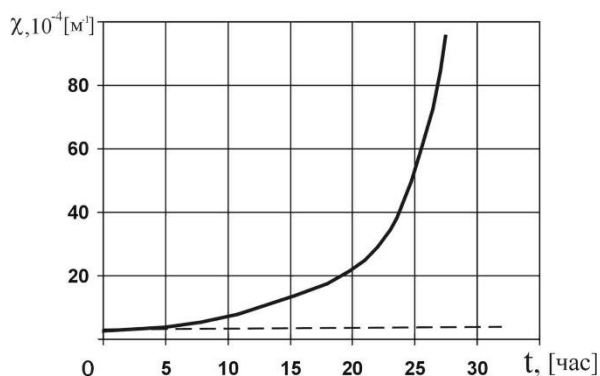


Рис. 3. – Изменение кривизны облученной (сплошная линия) и необлученной (пунктир) балки из стали ОХ16Н15МЗБ с течением времени [The change in the curvature of the irradiated (solid line) and unirradiated (dashed) girder from ОХ16Н15МЗБ steel with time]

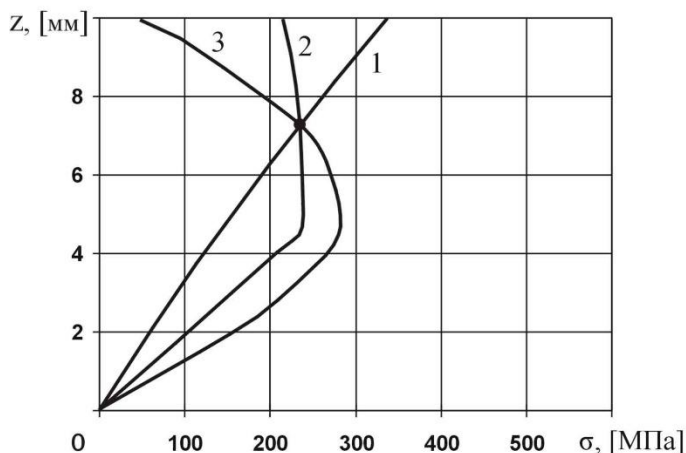


Рис. 4. – Эпюры напряжений по высоте верхней половины сечения балки для разных моментов времени: 1 – при $t = 0$ часов, 2 – при $t = 9$ часов, 3 – при $t = 20$ часов [Stress diagrams for the height of the beam upper section half for different times: 1 - at $t = 0$ hours, 2 - at $t = 9$ hours, 3 - at $t = 20$ hours]

С целью контроля правильности полученных результатов, отдельные результаты расчета изгибаемой балки с помощью методики [17] сравнивались с экспериментальными данными для образца, растягиваемого некоторым напряжением σ_0 . Приведенное напряжение σ'_0 , соответствующее изгибающему моменту $M = 2,24 \times 10^5$ МПа·мм³ равно 336 МПа. Напряжение растяжения σ_0 , соответствующее приведенному напряжению: $\sigma = \sigma'_0 \cdot \beta$ [17] равно $\sigma_0 = 235$ МПа.

На рисунке 6 показана (сплошной линией) экспериментальная кривая ползучести образца, растягиваемого напряжением $\sigma_0 = 235$ МПа и (пунктиром) расчетная кривая нарастания деформации ползучести в точке балки с координатой $z = h/2$ для приведенного напряжения $\sigma'_0 = 336$ МПа. Сопоставление кривых ползучести дает

возможность заключить об удовлетворительном совпадении расчета с экспериментом по долговечности.

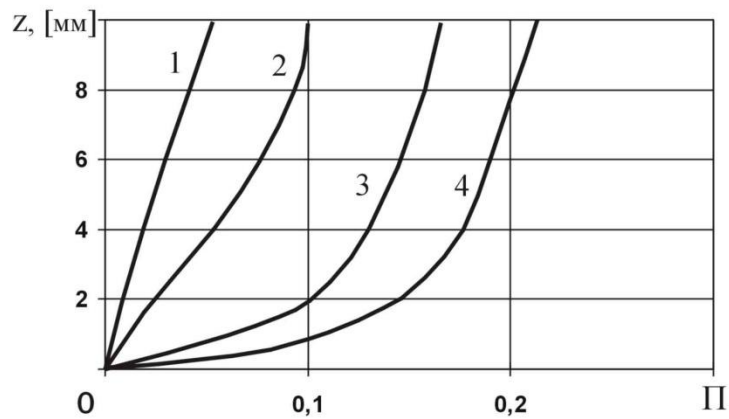


Рис. 5. – Эпюры распределения параметра поврежденности Π на верхней половине высоты сечения балки из стали ОХ16Н15М3Б в моменты времени:

1 – при $t = 3$ часа, 2 – при $t = 15$ часов, 3 – при $t = 25$ часов, 4 – при $t = 29$ часов [The distribution diagrams of the damage parameter P on the upper half of the beam sectional height of OX16H15M3B steel at the time instants: 1 for $t = 3$ hours, 2 for $t = 15$ hours, 3 for $t = 25$ hours, 4 for $t = 29$ hours]

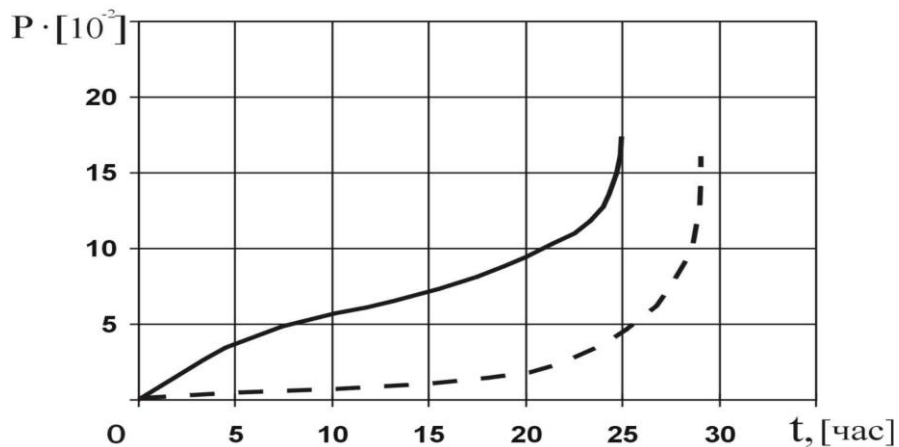


Рис. 6. – Сопоставление кривых ползучести при растяжении образца (сплошная линия) и при изгибе балки (пунктир) [Comparison of creep curves when the specimen is stretched (solid line) and when the beam is bent (dotted line)]

ВЫВОДЫ

1. Анализ результатов проведенных расчетов позволяет заключить, что применение зависимостей (1) и (2) позволяет производить численное моделирование поведения изгибаемых элементов при ползучести, как в условиях отсутствия радиационного облучения, так и после их облучения определенной дозой. При этом с целью повышения точности получаемых результатов рекомендуется при выполнении процедуры идентификации моделей использовать не только экспериментальные данные по длительной прочности и длительной пластичности, но и кривые ползучести.

2. Для моделирования поведения изгибаемых элементов конструкций в процессе радиационного облучения необходимо использовать для идентификации моделей (нахождения коэффициентов и функций) экспериментальные данные, полученные не после облучения образцов, а в процессе их облучения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дубровский, В.Б. Радиационная стойкость строительных материалов [Текст] / В.Б. Дубровский. – М.: Стройиздат, 1977. – 278 с.
2. Киселевский, В.Н. Изменение механических свойств сталей и сплавов при радиационном облучении [Текст] / В.Н. Киселевский. – Киев: «Наукова думка», 1977. – 104 с.
3. Писаренко, Г.С. и др. Прочность и пластичность материалов в радиационных потоках [Текст] / Г.С. Писаренко, В.Н. Киселевский. – Киев: «Наукова Думка», 1979. – 281 с.
4. Дубровский, В.Б. и др. Строительные материалы и конструкции защиты от ионизирующего излучения [Текст] / В.Б. Дубровский, З. Аблевич. – М.: Стройиздат, 1983. – 240 с.
5. Гусев, Н.Г. и др. Защита от ионизирующих излучений [Текст] / Н.Г. Гусев, В.А. Климанов, В.П. Машкович, А.П. Суворов. – Т. 1. – М.: Энергоатомиздат. – 1989. – 509 с.
6. Овчинников, И.И. и др. Влияние радиационных сред на механические характеристики материалов и поведение конструкций (обзор) [Электронный ресурс] / И.И. Овчинников, И.Г. Овчинников, М.Ю. Богина, А.В. Матора // Наукоедение: сетев. журн. – 2012. – №4.
7. Лихачев, Ю.И. и др. Прочность тепловыделяющих элементов ядерных реакторов [Текст] / Ю.И. Лихачев, В.Я. Пупко. – М.: Атомиздат, 1975. – 378 с.
8. Овчинников, И.Г. и др. Учёт радиационного облучения при расчёте тонкостенных элементов конструкций [Текст] / И.Г. Овчинников В.В. Петров. – Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 1982. – 18 с. Деп в ВИНТИ 07. 01. 1982 №1341-82.
9. Лихачев, Ю.И. и др. Методы расчета на прочность тепловыделяющих элементов ядерных реакторов [Текст] / Ю.И. Лихачев, В.Я. Пупко, В.В. Попов. – М.: Энергоатомиздат, 1982. – 210 с.
10. Куликов, И.С. и др. Прочность тепловыделяющих элементов быстрых газоохлаждаемых реакторов [Текст] / И.С. Куликов, Б.Е. Тверковкин. Под ред. В.Б. Нестеренко. – Минск: Наука и техника. 1984. – 104с.
11. Тутнов, А.А. Методы расчета работоспособности элементов конструкций ядерных реакторов [Текст] / А.А. Тутнов. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 184 с.
12. Андреев, В.И. Некоторые задачи и методы механики неоднородных тел [Текст] / В.И. Андреев: монография. – М.: Издательство АСВ, 2002. – 288 с.
13. Марголин, Б.З. и др. Моделирование разрушения материалов при длительном статическом нагружении в условиях ползучести и нейтронного облучения. Сообщение 1. Физико-механическая модель [Текст] / Б.З. Марголин, А.Г. Гуленко, И.П. Курсевич, А.А. Бучатский // Проблемы прочности. – 2006. – №3. – С. 5–22.
14. Марголин, Б.З. и др. Моделирование разрушения материалов при длительном статическом нагружении в условиях ползучести и нейтронного облучения. Сообщение 2. Прогнозирование длительной прочности [Текст] / Б.З. Марголин, А.Г. Гуленко, И.П. Курсевич, А.А. Бучатский // Проблемы прочности. – 2006. – №5. – С. 5–16.
15. Андреев, В.И. и др. Влияние радиационного облучения на напряженное состояние сферической бетонной оболочки [Текст] / В.И. Андреев, И.А. Дубровский // International Journal for Computational Civiland Structural Engineering. – 2010. – №6(1&2). – С. 39–44.
16. Овчинников, И.И. и др. Модели и методы, используемые при расчете и моделировании поведения конструкций, подвергающихся воздействию радиационных сред [Электронный ресурс] / И.И. Овчинников, И.Г. Овчинников, М.Ю. Богина, А.В. Матора // Наукоедение: сетевой журн. – 2013. – №2. – С. 1–30.
17. Лихачев, Ю.И. и др. Длительная прочность и ползучесть оболочек твэл быстрых реакторов [Текст] / Ю.И. Лихачев, В.Н. Вахромеева // Сборник докладов I-го симпозиума стран членов СЭВ. – Обнинск, 1967. – 158 с.

REFERENCES

- [1] Dubrovskiy V.B. Radiatsionnaya stoykost stroitelnykh materialov [Radiation Resistance of Building Materials]. M. Pub. Stroyizdat, 1977, 278 p. (in Russian)
- [2] Kiselevskiy V.N. Izmenenie mekhanicheskikh svoystv staley i splavov pri radiatsionnom obluchenii [Changes in Mechanical Properties of Steels and Alloys under Radiation Irradiation]. Kiev. Pub. Naukova dumka, 1977, 104 p. (in Russian)
- [3] Pisarenko G.S., Kiselevskiy V.N. Prochnost i plastichnost materialov v radiatsionnykh potokakh [Strength and Plasticity of Materials In Radiation Fluxes]. Kiev. Pub. Naukova Dumka, 1979, 281 p. (in Russian)
- [4] Dubrovskiy V.B., Ablevich Z. Stroitelnye materialy i konstruktсии zashchity ot ioniziruyushchego izlucheniya [Building Materials and Structures for Protection against Ionizing Radiation]. M. Pub. Stroyizdat, 1983, 240 p. (in Russian)
- [5] Gusev N.G., Klimanov V.A., Mashkovich V.P., Suvorov A.P. Zashchita ot ioniziruyushchikh izlucheniya [Protection against Ionizing Radiation]. Vol. 1. M. Pub. Energoatomizdat, 1989, 509 p. (in Russian)
- [6] Ovchinnikov I.I., Ovchinnikov I.G., Bogina M.Yu., Matora A.V. Vliyanie radiatsionnykh sred na mekhanicheskie kharakteristiki materialov i povedenie konstruktсий (obzor) [Influence of Radiation Media on

- the Mechanical Characteristics of Materials and Behavior of Structures (review)]. *Naukovedenie* [Naukovedenie], 2012, №4. (in Russian)
- [7] Likhachev Yu.I., Pupko V.Ya. Prochnost teplovydelyayushchikh elementov yadernykh reaktorov [Strength of Fuel Elements of Nuclear Reactors]. M. Pub. Atomizdat, 1975, 378 p. (in Russian)
- [8] Ovchinnikov I.G., Petrov V.V. Uchet radiatsionnogo oblucheniya pri raschete tonkostennykh elementov konstruksiy [Accounting for Radiation Exposure in Calculation of Thin-Walled Structural Elements]. Saratov, 18 p. Deponirovano v VINITI [Deposited in VINITI] 07. 01. 1982 №1341-82 (in Russian)
- [9] Likhachev Yu.I., Pupko V.Ya., Popov V.V. Metody rascheta na prochnost' teplovydelyayushchikh elementov yadernykh reaktorov [Methods for Calculating the Strength of Nuclear Reactor Fuel Elements]. M. Pub. Energoatomizdat, 1982, 210 p. (in Russian)
- [10] Kulikov I.S., Tverkovkin B.E. Prochnost teplovydelyayushchikh elementov bystrykh gazookhlazhdaemykh reaktorov [Strength of Fuel Elements of Fast Gas-Cooled Reactors]. Pod redakciej [Edited by] V.B. Nesterenko. Miskn. Pub. Nauka i tekhnika, 1984, 104 p. (in Russian)
- [11] Tutnov A.A. Metody rascheta rabotosposobnosti elementov konstruksiy yadernykh reaktorov [Methods for Calculating the Operability of Structural Elements of Nuclear Reactors]. M. Pub. Energoatomizdat, 1987, 184 p. (in Russian)
- [12] Andreev V.I. Nekotorye zadachi i metody mekhaniki neodnorodnykh tel [Some Problems and Methods of Mechanics of Inhomogeneous Bodies]. M. Pub. ASV, 2002, 288 p. (in Russian)
- [13] Margolin B.Z., Gulenko A.G., Kursevich I.P., Buchatskiy A.A. Modelirovanie razrusheniya materialov pri dlitel'nom staticheskom nagruzhenii v usloviyakh polzuchesti i neytronnogo oblucheniya. Soobshchenie 1. Fiziko-mekhanicheskaya model [Modeling the Destruction of Materials under Prolonged Static Loading under Conditions of Creep and Neutron Irradiation. Message 1. Physico-Mechanical Model]. Problemy prochnosti [Strength Problems], 2006, №3, pp. 5–22. (in Russian)
- [14] Margolin B.Z., Gulenko A.G., Kursevich I.P., Buchatskiy A.A. Modelirovanie razrusheniya materialov pri dlitel'nom staticheskom nagruzhenii v usloviyakh polzuchesti i neytronnogo oblucheniya. Soobshchenie 2. Prognozirovanie dlitel'noy prochnosti [Modeling the Destruction of Materials under Prolonged Static Loading under Conditions of Creep and Neutron Irradiation. Message 2. Forecasting Long-Term Strength]. Problemy prochnosti [перевод], 2006, №5, pp. 5–16. (in Russian)
- [15] Andreev V.I., Dubrovskiy I.A. Vliyanie radiatsionnogo oblucheniya na napryazhennoe sostoyanie sfericheskoy betonnoy obolochki. Influence of Radiation Irradiation on the Stressed State of a Spherical Concrete Shell. International Journal for Computational Civil and Structural Engineering, 2010, №6(1&2), pp. 39–44. (in Russian)
- [16] Ovchinnikov I.I., Ovchinnikov I.G., Bogina M.Yu., Matora A.V. Modeli i metody, ispolzuemye pri raschete i modelirovanii povedeniya konstruksiy, podvergayushchikhsya vozdeystviyu radiatsionnykh sred [перевод]. Naukovedenie [Models and Methods Used in the Calculation and Modeling of the Behavior of Structures Exposed to Radiation Media], 2013, №2, pp. 1–30. (in Russian)
- [17] Likhachev Yu.I., Vakhromeeva V.N. Dlitelnaya prochnost i polzuchest obolochek tvel bystrykh reaktorov [Long-Term Strength and Creep of Fuel Rod Clusters for Fast Reactors]. Sbornik dokladov I simpoziuma stran chlenov SEV [Collected Papers of the First Symposium of the CMEA Countries]. Obninsk, 1967, 158 p. (in Russian)

Calculation of Stressed State and Durability of Bending Element Taking into Account Radiation Environment Influence

R.B. Garibov*, I.G. Ovchinnikov***

* *Balakovo Engineering Technical Institute - branch of the National Research Nuclear University MEPhI,
Balakovo, Saratov Region, Russia*

*** *Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia*

Abstract – The paper considers problem of computational modeling of the bent structural element (beam) subjected to a joint action of a bending moment and radiation irradiation. The basic equations of the model taking into account the process of damage accumulation and the influence of irradiation are given. Using the experimental data on the basis of the method of least squares, the model was identified, that is, the values of the coefficients were determined. Comparison of the calculation results with the help of the coefficients found with the experimental data was made, which showed good agreement of the results. Then the simulation of the irradiated beam loaded with a moment is performed numerically using the above equations with the found values of the coefficients. The effect of irradiation on the kinetics of the change in curvature is studied; stresses and damages are plotted along the cross-section of the beam at different instants of time. It is recommended to use not only experimental data on long-term strength and long-term ductility but also creep curves to improve the accuracy of modeling results when identifying models.

Keywords: radiation, radiation exposure, modeling, fluence, durability, bending element, beam.