

УДК 539.3

## ПРОГНОЗИРОВАНИЕ КОРРОЗИОННОГО РАСТРЕСКИВАНИЯ КОНСТРУКЦИЙ ПРИ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПОЛЗУЧЕСТИ

*О. К. МОРАЧКОВСКИЙ, Ю. В. РОМАШОВ*

*Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт"*

На основе предложенной ранее континуальной модели роста трещин коррозионного растрескивания и распространенной теории ползучести инкрементального типа рассмотрено прогнозирование коррозионного растрескивания конструкций при высокотемпературной ползучести. Дана математическая постановка задачи, в которой учтено влияние на коррозионное растрескивание свойств агрессивной среды и перераспределения напряжений во времени вследствие ползучести. Для решения задачи использован метод Бубнова–Галеркина. Рассмотрен пример прогнозирования коррозионного растрескивания при ползучести трубы под внутренним давлением.

**Ключевые слова:** *коррозионное растрескивание, ползучесть, повреждаемость, метод Бубнова–Галеркина, труба под внутренним давлением.*

Актуальность проблемы прогнозирования коррозионного растрескивания при высокотемпературной ползучести обусловлена тем, что подверженные коррозии элементы конструкций, как правило, дорогостоящие, не пригодные для ремонта и трудно заменяемые. К ним относятся, например, пароперегреватели в паровых котлах [1]. Ползучесть приводит к неоднородному непрерывно изменяющемуся во времени формоизменению элемента конструкции, которое сопровождается перераспределением напряжений и повреждаемостью. Влияние таких процессов на коррозионное растрескивание элементов конструкций зависит от свойств их материала, внешних нагрузок, их геометрической формы и закрепления. Учет этих факторов возможен на основе механики деформируемых твердых тел и законов поведения материалов при коррозионном растрескивании и ползучести. Например, этот подход использован ранее [2] к решению задачи об оценке времени докритического роста трещины при высокотемпературной ползучести колеса паровой турбины. Цель настоящей работы – прогнозирование коррозионного растрескивания при высокотемпературной ползучести на основе предложенной ранее [3] континуальной модели роста трещин коррозионного растрескивания и теории ползучести инкрементального типа.

**Математическая постановка задачи.** В прямоугольных декартовых координатах  $x_k$ ,  $k = 1, 2, 3$  рассмотрим деформируемое твердое тело объемом  $\Upsilon$  с поверхностью  $\upsilon$ , которое нагружено заданными объемными  $f_i$  и приложенными на части поверхности  $\upsilon_p \subset \upsilon$  поверхностными  $p_i$  силами. На закрепленной части поверхности  $\upsilon_u \subset \upsilon$  заданы перемещения точек тела  $u_i^{(0)}$ . Кроме того, примем, что на части поверхности  $\upsilon_{SCC} \subset \upsilon$  тело взаимодействует со средой, вызывающей коррозионное растрескивание. Стационарное тепловое состояние тела считаем заданным и определяем полем температуры  $T = T(x_k)$ ,  $x_k \in \Upsilon$ . Состояние тела, деформирующегося при ползучести, в произвольные моменты времени  $t \geq 0$

характеризуется компонентами вектора перемещений  $u_i = u_i(t, x_k)$ , тензоров напряжений  $\sigma_{ij} = \sigma_{ij}(t, x_i)$ , полных деформаций  $\varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ij}(t, x_i)$  и деформаций ползучести  $c_{ij} = c_{ij}(t, x_k)$ , параметром повреждаемости  $\omega_c = \omega_c(t, x_k)$  [4]. Для описания роста трещин коррозионного растрескивания принимаем [3] параметр коррозионного растрескивания  $\omega_{SCC} = \omega_{SCC}(t, x_k)$ ,  $0 \leq \omega_{SCC} < 1$ ,  $x_k \in \upsilon_{SCC}$ , отвечающий нормированной длине визуально невидимой трещины. Тогда полную систему уравнений, описывающую ползучесть и коррозионное растрескивание однородного изотропного деформируемого твердого тела при малых деформациях, можно представить в виде

$$\frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} + f_i = 0; \sigma_{ij} n_j = p_i, x_k \in \upsilon_p; \sigma_{ij} n_i n_j = -p_{SCC}, \sigma_{ij} \tau_i n_j = 0, \sigma_{ij} b_i n_j = 0, x_k \in \upsilon_{SCC};$$

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right); u_i = u_i^{(0)}, x_k \in \upsilon_u; \varepsilon_{ij} = e_{ij} + c_{ij}; e_{ij} = \frac{1+\nu}{E} \sigma_{ij} - \frac{\nu}{E} \sigma_{kk} \delta_{ij} + \alpha \Delta T \delta_{ij}, \quad (1)$$

$$\frac{\partial c_{ij}}{\partial t} = \frac{3}{2} \frac{\dot{c}_e}{\sigma_e} \left( \sigma_{ij} - \frac{1}{3} \sigma_{kk} \delta_{ij} \right), c_{ij}(0, x_k) = 0; \frac{\partial \omega_c}{\partial t} = \dot{\omega}_c(\sigma_e, \omega_c; T), \omega_c(0, x_k) = 0, \quad (2)$$

$$\frac{\partial \omega_{SCC}}{\partial t} = \dot{\omega}_{SCC}(\omega_{SCC}; \sigma_{SCC}, T, \chi_1, \chi_2, \dots), \sigma_{SCC} = \sigma_{SCC}(\sigma_{ij}); \omega_{SCC}(0, x_i) = 0, \quad (3)$$

где  $E$ ,  $\nu$  и  $\alpha$  – модуль Юнга, коэффициенты Пуассона и температурного расширения материала;  $n_i$  – компоненты вектора внешней единичной нормали к поверхности тела;  $\delta_{ij}$  – символы Кронекера;  $\Delta T$  – изменение температуры;  $\dot{c}_e = \dot{c}_e(c_e, \sigma_e, \omega_c; T)$ ,  $\dot{\omega}_c(\sigma_e, \omega_c; T)$  – скорости эквивалентной деформации ползучести  $c_e$  и параметра повреждаемости  $\omega_c$ , зависящие от эквивалентных деформаций ползучести и напряжений  $\sigma_e$ , устанавливаемые по экспериментальным кривым ползучести и длительной прочности вплоть до разрушения при заданной температуре;  $p_{SCC}$  – давление агрессивной среды на поверхности  $\upsilon_{SCC} \subset \upsilon$  с нормалью  $n_i$  и ортами  $\tau_i$ ,  $b_i$ , лежащими в плоскости касательной к этой поверхности;  $\dot{\omega}_{SCC} = \dot{\omega}_{SCC}(\omega_{SCC}; \sigma_{SCC}, T, \chi_1, \chi_2, \dots)$  – закон изменения параметра коррозионного растрескивания со временем, который устанавливают по экспериментальным данным о коррозионном растрескивании материала тела при заданной температуре, эквивалентном напряжении растрескивания  $\sigma_{SCC}$  и параметрах  $\chi_1, \chi_2, \dots$  среды.

Уравнением (3) с начальным условием описывают рост трещин коррозионного растрескивания при ползучести в зависимости от эквивалентного напряжения коррозионного растрескивания  $\sigma_{SCC}$  [3]:

$$\sigma_{SCC}(\sigma_{ij}) = \max \{ \sigma \}; \begin{vmatrix} \sigma_{ij} \tau_i \tau_j - \sigma & \sigma_{ij} b_i \tau_j \\ \sigma_{ij} b_i \tau_j & \sigma_{ij} b_i b_j - \sigma \end{vmatrix} = 0; x_k \in \upsilon_{SCC}. \quad (4)$$

Значения  $\omega_{SCC} = 0$  и  $\omega_{SCC} = 1$  отвечают соответственно начальным (скрытым) и визуально наблюдаемым трещинам. Прогнозирование разрушения вследствие ползучести или коррозионного растрескивания сводится к определению времени  $t^*$  окончания скрытого разрушения или появления визуально наблюдаемого дефекта в точке тела при достижении одного из условий

$$\omega_c(t^*, x_k) = 1; \omega_{SCC}(t^*, x_k) = 1. \quad (5)$$

**Метод решения задачи.** Численно-аналитическое решение задачи (1)–(5) осуществим на основе метода Бубнова–Галеркина, подробно изложенного ранее

[5] применительно к задачам теории ползучести. Уравнения (1)–(3) относительно основных неизвестных задачи

$$\mathbf{v}^T = (c_{11}, c_{22}, c_{33}, c_{12}, c_{23}, c_{32}, \omega_c, \omega_{SCC}), \mathbf{u}^T = (\sigma_{11}, \sigma_{22}, \sigma_{33}, \sigma_{12}, \sigma_{23}, \sigma_{31}, u_1, u_2, u_3) \quad (6)$$

запишем в операторной форме:

$$\mathbf{A} \cdot \mathbf{u} + \mathbf{C} \cdot \mathbf{v} = \mathbf{f}, \quad x_k \in \Upsilon, \quad (7)$$

$$\partial \mathbf{v} / \partial t = \mathbf{k}(\mathbf{v}; \mathbf{u}), \quad \mathbf{v}(0, x_k) = \mathbf{0}, \quad x_k \in \upsilon_{SCC}, \quad (8)$$

где  $\mathbf{A}$ ,  $\mathbf{C}$ ,  $\mathbf{f}$  – линейные операторы и вектор, отвечающие дифференциальным уравнениям (1);  $\mathbf{k}$  – оператор, отвечающий дифференциальным уравнениям (2), (3).

Следуя методу Бубнова–Галеркина, представим искомые решения аппроксимациями [6]:

$$\mathbf{v}(t, x_k) \approx \mathbf{V}_n(x_k) \cdot \mathbf{v}_n(t); \quad \mathbf{u}(t, x_k) \approx \mathbf{u}_0(x_k) + \mathbf{U}_n(x_k) \cdot \mathbf{u}_n(t), \quad (9)$$

где  $\mathbf{V}_n(x_k)$ ,  $\mathbf{U}_n(x_k)$  – матрицы, составленные из  $n$  пробных функций;  $\mathbf{v}_n(t)$ ,  $\mathbf{u}_n(t)$  – векторы, составленные из коэффициентов аппроксимаций, причем  $\mathbf{v}_n(t) = \mathbf{0}$ ;  $\mathbf{u}_0(x_k)$  – заданный вектор, продлевающий граничные значения внутрь области  $\Upsilon$ .

В аппроксимациях (9) используем глобальные пробные функции, такие, чтобы при любом векторе  $\mathbf{u}_n(t)$  точно удовлетворялись граничные условия (1). Это можно осуществить при помощи методов теории R-функций и для областей неканонической и сложной формы [6].

Подставив аппроксимации (9) в уравнения (7), (8), из условий ортогональности невязок уравнений и пробных функций с учетом линейности операторов  $\mathbf{A}$  и  $\mathbf{C}$  получим:

$$\mathbf{A}_n \cdot \mathbf{u}_n + \mathbf{C}_n \cdot \mathbf{v}_n = \mathbf{f}_n; \quad d\mathbf{v}_n / dt = \mathbf{K}_n^{-1} \cdot \mathbf{k}_n(\mathbf{v}_n; \mathbf{u}_n), \quad (10)$$

где  $\mathbf{A}_n$ ,  $\mathbf{C}_n$ ,  $\mathbf{K}_n$  – матрицы и  $\mathbf{f}_n$ ,  $\mathbf{k}_n$  – векторы.

Матрицы  $\mathbf{A}_n$ ,  $\mathbf{C}_n$  и вектор  $\mathbf{f}_n$  из первого уравнения (10) найдем так:

$$\mathbf{A}_n = \int_{\Upsilon} \mathbf{U}_n^T \cdot (\mathbf{A} \cdot \mathbf{U}_n) d\Upsilon; \quad \mathbf{C}_n = \int_{\Upsilon} \mathbf{U}_n^T \cdot (\mathbf{C} \cdot \mathbf{V}_n) d\Upsilon; \quad \mathbf{f}_n = \int_{\Upsilon} \mathbf{U}_n^T \cdot (\mathbf{f} - \mathbf{A} \cdot \mathbf{u}_0) d\Upsilon. \quad (11)$$

Поскольку уравнение (2) определено во всей области  $\Upsilon$  тела, а уравнение (3) – только на части  $\upsilon_{SCC} \subset \upsilon$  граничной поверхности, то матрица  $\mathbf{K}_n$  и вектор  $\mathbf{k}_n$  имеют клеточную структуру:

$$\mathbf{K}_n = \begin{pmatrix} \mathbf{K}_n^{SCC} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{K}_n^c \end{pmatrix}; \quad \mathbf{k}_n(\mathbf{v}_n; \mathbf{u}_n) = \begin{pmatrix} \mathbf{k}_n^{SCC}(\mathbf{v}_n; \mathbf{u}_n) \\ \mathbf{k}_n^c(\mathbf{v}_n; \mathbf{u}_n) \end{pmatrix};$$

$$\mathbf{K}_n^{SCC} = \int_{\upsilon_{SCC}} ((\mathbf{V}_n^{SCC})^T \cdot \mathbf{V}_n^{SCC}) d\upsilon; \quad \mathbf{K}_n^c = \int_{\Upsilon} ((\mathbf{V}_n^c)^T \cdot \mathbf{V}_n^c) d\Upsilon;$$

$$\mathbf{k}_n^{SCC} = \int_{\upsilon_{SCC}} ((\mathbf{V}_n^{SCC})^T \cdot \mathbf{k}^{SCC}(\mathbf{v}_n; \mathbf{u}_n)) d\upsilon; \quad \mathbf{k}_n^c = \int_{\Upsilon} ((\mathbf{V}_n^c)^T \cdot \mathbf{k}^c(\mathbf{v}_n; \mathbf{u}_n)) d\Upsilon, \quad (12)$$

где  $\mathbf{k}^c(\mathbf{v}; \mathbf{u})$  и  $\mathbf{k}^{SCC}(\mathbf{v}; \mathbf{u})$  – векторы, отвечающие правым частям уравнений (2) и (3);  $\mathbf{V}_n^{SCC}(x_k)$  – матрица-строка из пробных функций параметра растрескивания и  $\mathbf{V}_n^c(x_k)$  – матрица из пробных функций деформаций ползучести и параметра повреждаемости;  $\mathbf{v}_n^{SCC}(t)$  и  $\mathbf{v}_n^c(t)$  – векторы из коэффициентов аппроксимации параметра растрескивания и деформаций ползучести с параметром повреждаемости.

Исключим из уравнений (10) вектор  $\mathbf{u}_n$  и для вектора  $\mathbf{v}_n$  получим задачу типа Коши:

$$d\mathbf{v}_n / dt = \mathbf{k}_n(\mathbf{v}_n); \quad \mathbf{v}_n(0) = \mathbf{0}, \quad (13)$$

где  $\mathbf{k}_n(\mathbf{v}_n) = \mathbf{K}_n^{-1} \cdot \mathbf{k}_n(\mathbf{v}_n; \mathbf{u}_n = \mathbf{A}_n^{-1} \cdot (\mathbf{f}_n - \mathbf{C}_n \cdot \mathbf{v}_n))$ .

**Расчетное прогнозирование коррозионного растрескивания труб.** Рассмотрим коррозионное растрескивание при ползучести в растворах хлорида магния трубы с внутренним  $r_1$  и наружным  $r_2$  радиусами, изготовленной из нержавеющей стали типа 18-8. Труба при отсутствии осевой нагрузки находится под внутренним давлением  $p$  и нагрета до температуры  $500^\circ\text{C}$ . Разрешающие уравнения, описывающие состояние в точках  $r_1 \leq r \leq r_2$  трубы, формулируем относительно напряжений  $\sigma_{rr} = \sigma_{rr}(t, r)$ ,  $\sigma_{\theta\theta} = \sigma_{\theta\theta}(t, r)$ , перемещения  $u_r = u_r(t, r)$ , деформаций ползучести  $c_{rr} = c_{rr}(t, r)$ ,  $c_{\theta\theta} = c_{\theta\theta}(t, r)$ , параметров повреждаемости  $\omega_c = \omega_c(t, r)$  и коррозионного растрескивания  $\omega_{SCC} = \omega_{SCC}(t)$ . В цилиндрической системе координат, с учетом осевой симметрии, уравнения (1)–(3) преобразуются к виду

$$\begin{aligned} \frac{\partial \sigma_{rr}}{\partial r} + \frac{\sigma_{rr} - \sigma_{\theta\theta}}{r} &= 0; \quad \sigma_{rr}(t, r_1) = p; \quad \sigma_{rr}(t, r_2) = 0; \\ -\frac{1}{E} \sigma_{rr} + \frac{\nu}{E} \sigma_{\theta\theta} + \frac{\partial u_r}{\partial r} - \alpha \Delta T - c_{rr} &= 0; \quad -\frac{1}{E} \sigma_{\theta\theta} + \frac{\nu}{E} \sigma_{rr} + \frac{u_r}{r} - \alpha \Delta T - c_{\theta\theta} = 0, \quad (14) \\ \frac{\partial c_{rr}}{\partial t} = \frac{3}{2} \frac{\dot{c}_e}{\sigma_e} \left( \frac{2}{3} \sigma_{rr} - \frac{1}{3} \sigma_{\theta\theta} \right); \quad \frac{\partial c_{\theta\theta}}{\partial t} = \frac{3}{2} \frac{\dot{c}_e}{\sigma_e} \left( \frac{2}{3} \sigma_{\theta\theta} - \frac{1}{3} \sigma_{rr} \right); \quad c_{rr}(0, r) = 0; \quad c_{\theta\theta}(0, r) = 0; \\ \dot{c}_e = B \left( \frac{\sigma_e}{1 - \omega_c} \right)^q; \quad \dot{\omega}_c = A \left( \frac{\sigma_e}{1 - \omega_c} \right)^k; \quad \omega_c(0, r) = 0; \quad \sigma_e = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_{\theta\theta} - \sigma_{rr})^2 + \sigma_{rr}^2 + \sigma_{\theta\theta}^2}, \quad (15) \end{aligned}$$

$$\frac{\partial \omega_{SCC}}{\partial t} = a \cdot 10^{b\sigma_{SCC} + c\chi} (1 - \omega_{SCC})^d; \quad \sigma_{SCC}(t) = \sigma_{\theta\theta}(t, r_{SCC}); \quad \omega_{SCC}(0) = 0, \quad (16)$$

где  $E = 1,62 \cdot 10^5$  МПа;  $\nu = 0,3$ ;  $\alpha = 18,4 \cdot 10^{-6}$ ,  $1/^\circ\text{C}$  – модуль Юнга, коэффициент Пуассона и коэффициент линейного расширения нержавеющей стали типа 18-8 при  $500^\circ\text{C}$  [7]; значения  $A = 3,799 \cdot 10^{-35}$  МПа $^{-k}/\text{h}$ ,  $B = 8,859 \cdot 10^{-13}$  МПа $^{-q}/\text{h}$ ,  $q = 2,023$ ;  $k = 12,344$  получены обработкой изохронных кривых ползучести и длительной прочности стали [7]; значения констант  $a = 1,645 \cdot 10^{-7}$ ,  $b = 6,133 \cdot 10^{-3}$ ,  $c = 9,306 \cdot 10^{-2}$ ,  $d = 1$  отвечают предложенной ранее [3] континуальной модели коррозионного растрескивания нержавеющей сталей в растворах хлорида магния, которая при содержании хлорида магния  $\chi = 5 \dots 10\%$  удовлетворительно описывает действие агрессивной среды второго контура АЭС с ВВЭР;  $r_{SCC}$  – координата точек поверхности трубы, взаимодействующей с агрессивной средой.

В расчетах прогнозирования коррозионного растрескивания трубы под внутренним давлением принято, что  $p = 40$  МПа,  $r_1 = 0,017$  м,  $r_2 = 0,021$  м. Расчеты показали, что коррозионное растрескивание происходит через  $\cong 69075 \div 121518$  h (рис. 1) и раньше окончания скрытого разрушения  $\cong 168066$  h вследствие ползучести трубы под внутренним давлением. Выявлено, что при действии агрессивной среды на внутреннюю поверхность трубы  $r_{SCC} = r_1$  (рис. 1, кривые 1), в условиях ползучести, когда напряжения изменяются со временем (рис. 2), время растрескивания больше (пунктирная кривая), чем при упругом деформировании (сплошная кривая). Вместе с тем, когда  $r_{SCC} = r_2$  (рис. 1, кривые 2), время растрескивания при ползучести меньше (пунктирная кривая), чем при упругом деформировании (сплошная).

Влияние ползучести на время коррозионного растрескивания объясняется перераспределением за время растрескивания трубы окружного напряжения, которое с течением времени на внутренней поверхности уменьшается, а на наружной – увеличивается (рис. 2, кривые 2 и 3) в сравнении со значениями, соответствующими только упругому деформированию (рис. 2, кривая 1).

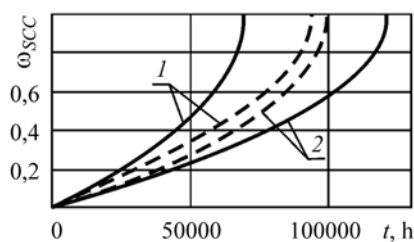


Рис. 1. Fig. 1.

Рис. 1. Зависимости параметра коррозионного растрескивания  $\omega_{SCC}$  от времени  $t$  при действии агрессивной среды на внутреннюю (кривые 1) и наружную (кривые 2) поверхности трубы при упругом деформировании (сплошные линии) и ползучести (штриховые).

Fig. 1. Stress corrosion cracking parameter,  $\omega_{SCC}$ , versus time,  $t$ , in the cases of corrosive medium action on internal (curves 1) and external (curves 2) surfaces of a pipe under internal elastic deformation (solid lines) and creep (dashed lines).

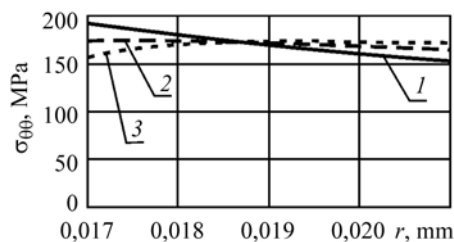


Рис. 2. Fig. 2.

Рис. 2. Распределение напряжения  $\sigma_{\theta\theta}$  по толщине трубы, находящейся под внутренним давлением при упругом деформировании (кривая 1), и при ползучести в моменты времени  $t = 28672$  h (кривая 2) и  $\cong 94637$  h (кривая 3).

Fig. 2. Distribution of stress,  $\sigma_{\theta\theta}$ , along the thickness of the pipe subjected to internal pressure under elastic deformation (curve 1) and creep at time  $t = 28672$  h (curve 2) and  $\cong 94637$  h (curve 3).

**РЕЗЮМЕ.** На основі запропонованої раніше моделі росту тріщин корозійного розтріскування та розповсюдженої теорії повзучості інкрементального типу розглянуто прогнозування корозійного розтріскування конструкцій за наявності високотемпературної повзучості. Подано математичну постановку задачі, в якій враховано вплив на корозійне розтріскування властивостей агресивного середовища й перерозподілу напружень у часі внаслідок повзучості. Для розв'язання задачі використано метод Бубнова–Гальоркіна. Розглянуто приклад з прогнозуванням корозійного розтріскування за умов повзучості труби під внутрішнім тиском.

**SUMMARY.** Based on a previously proposed model of stress corrosion crack growth and incremental creep theory the prediction of structural elements stress corrosion cracking under high-temperature creep is considered. The mathematical formulation of the problem, which takes into account the impact of the corrosive environment properties and stress redistribution in time due to creep on stress-corrosion cracking is proposed. The Bubnov–Galerkin method is applied to solve the problem. An example of the prediction of stress corrosion cracking in the conditions of the pipe creep under internal pressure is considered.

1. Резников М. И., Литов Ю. М. Паровые котлы тепловых электростанций. – М.: Энергоиздат, 1981. – 242 с.
2. Андрейків О. Є., Сас Н. Б. Оцінка періоду докритичного росту тріщини високотемпературної повзучості в колесі парової турбіни // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2010. – № 3. – С. 16–22.
3. Морачковский О. К., Ромашиов Ю. В. Континуальная модель роста трещин коррозионного растрескивания для расчета ресурса конструкций // Там же. – 2010. – № 2. – С. 111–116.
4. Писаренко Г. С., Можаровский Н. С. Уравнения и краевые задачи теории пластичности и ползучести. – К.: Наук. думка, 1981. – 496 с.
5. Морачковский О. К., Ромашиов Ю. В. К решению начально-краевых задач теории ползучести // Прикл. механика. – 2009. – 45, № 10. – С. 33–44.
6. Рвачев В. Л. Теория R-функций и некоторые ее приложения. – К.: Наук. думка, 1982. – 522 с.
7. Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок (ПНАЭ Г-7-002-86) / Госатомэнергоназор СССР. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 525 с.

Получено 27.09.2010