

УДК 539.4

П.Н.ДЕМИДОВ; В.А.ЖОВДАК, докт.техн.наук; НТУ «ХПИ»;
А.С.КИПОРЕНКО; В.В.ЛОКОШКО, канд.техн.наук; Ин-т проблем
управления, Харьков;
С.М.ПОЛИЩУК, канд.техн.наук; УИПА, Харьков;
А.И.ТРУБАЕВ, канд.техн.наук; НТУ «ХПИ»;

ПРИМЕНЕНИЕ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА ТРУБОПРОВОДОВ АЭС

У роботі досліджувався напружено-деформований стан частини головного циркуляційного трубопроводу АЕС з експлуатаційними дефектами. Визначався залишковий ресурс ділянки трубопроводу з використанням чисельних методів.

In work the is tensely-deformed condition of a part of the main circulating pipeline of the atomic power station with operational defects was investigated. The residual resource of a site of the pipeline with use of numerical methods was defined.

Проблемы, связанные с определением гарантированных сроков безопасной эксплуатации трубопроводов ядерных установок, являются актуальными в настоящее время в связи с исчерпанием проектных сроков их эксплуатации [1,2]. Один из возможных подходов решения этой проблемы связан с внедрением в практику безаварийной эксплуатации оборудования АЭС современных средств исследования деградации физико-механических характеристик конструкционных материалов, а также диагностики реального технического состояния трубопроводов с целью обнаружения в них различного рода дефектов. Полученная при этом информация обладает некоторой степенью неопределенности, поэтому для прогнозирования остаточного ресурса трубопроводов должны использоваться вероятностные расчетно-экспериментальные подходы, которые базируются на конечно-элементных моделях и включают следующие основные этапы:

- определение данных о фактическом нагружении трубопроводов за весь период эксплуатации, включая механические, температурные и радиационные воздействия;
- определение физико-механических характеристик, структуры, степени усталостного повреждения основного металла и сварных швов на базе ультразвуковой, акустической, магнитной дефектоскопии;

- построение конечно-элементных моделей для расчета напряженно-деформированного состояния и повреждаемости трубопроводов с целью выявления наиболее опасных мест;
- прогнозирование индивидуального остаточного ресурса трубопроводов с учетом всех возможных моделей разрушения на основе вероятностных расчетно-экспериментальных подходов;
- вероятностный расчет длительной и статической прочности, много- и малоциклового усталости с учетом эрозионно-коррозионного износа и развития других локальных дефектов.

Данная работа посвящена разработке метода прогнозирования ресурса трубопроводов АЭС при усталостных отказах с учетом эрозионно-коррозионного износа на основе расчетно-экспериментальных подходов. Используются многоуровневые конечно-элементные модели, позволяющие определить характеристики напряженно-деформированного состояния (НДС) как трубопровода в целом, так и наиболее нагруженных его фрагментов.

В процессе эксплуатации с 1982 года первого и второго (1985) блоков Южноукраинской АЭС выявлены значительные эрозионные повреждения гибов, переходов, тройников, отводов и др. участков трубопроводов греющего пара первой ступени СПП (сепаратор пароперегревателя), конденсата греющего пара ПВД (подогреватель высокого давления) СПП и др., трубопроводов, несущих как однофазный, так и двухфазные потоки. На ЮУ АЭС были получены результаты ультразвуковой толщинометрии, металлографического анализа и режима нагружения [3]. В табл. 1 представлены рабочие параметры трубопроводов и скорость эрозионного износа.

Таблица 1 – Рабочие параметры трубопроводов и скорость эрозионного износа

№	Трубопровод	Ø	$T_{\text{раб}},$ °C	$P_{\text{раб}},$ кгс/см ²	$U,$ м/с	$\rho,$ кг/м ³	$v,$ мм/год
1	ПВД - 6 в Д-7ата	530x8	186	18	0,63	800-400	0,3-0,41
2	КС 1ст. СПП в Д-7ата	219x8	211	19	1,7	800	0,37
3	1ст. промперегрева СПП Д-7ата	273x10	211	19	1,1	800	0,22
4	2ст. СПП в Д-7ата	426x14	233	30	1,1	800	0,39
5	2ст. Промперегрева СПП	273x16	233	30	1,8	800	0,3

Проведенные металлографические исследования демонтированного металла показали, что дефектов микроструктуры не выявлено. Микроструктура металла феррито-перлитная и соответствует микроструктуре углеродистой стали 20. Содержание углерода в пределах 0,22 %. Качество металла соответствует требованиям ТУ 14-3-190-82 и ГОСТ 8731.

В дальнейшем на основе метода ультразвуковой толщинометрии определены положения и геометрические размеры дефектов в трубопроводе, которые возникли в результате эрозионно-коррозионного износа (рис. 1) и получе-

на новая геометрия в локальных местах.

В соответствии с разработанной методикой были проведены исследования трубопровода первого контура энергоустановки с реактором ВВЭР – 440, фрагмент которого представлен на рис. 1. Для расчета характеристик НДС всего трубопровода, находящегося под действием внутреннего давления, были использованы оболочечные 8-ми узловые конечные элементы. Для исследования локальных характеристик НДС фрагмента трубопровода (рис. 2) применялись модели второго уровня на основе трехмерных 20-ти узловых конечных элементов. При расчете напряжений для отдельных фрагментов трубопровода в качестве информации о нагружении задаются значения узловых перемещений в крайних сечениях фрагмента, которые определены из решения задачи для всей системы.

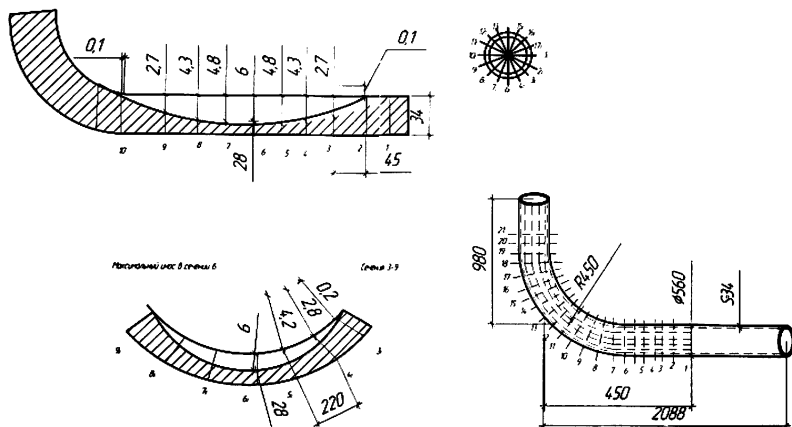
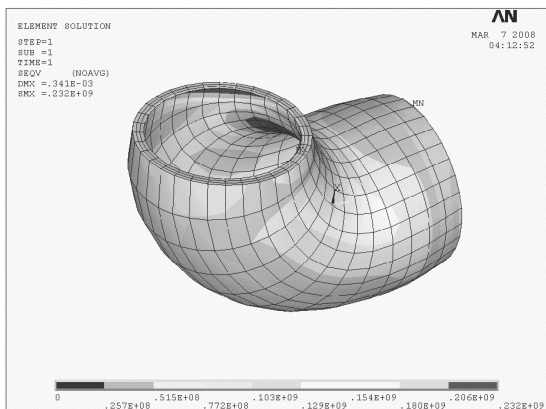


Рисунок 1 – Положение и геометрические размеры дефекта

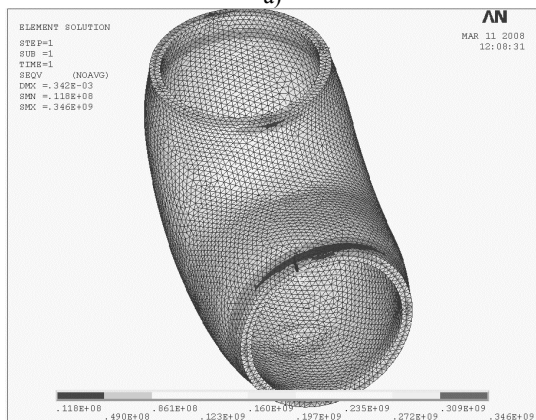
На рис 2 представлены результаты расчета наиболее нагруженного криволинейного фрагмента трубопровода, полученные на основе модели второго уровня без учета (рис 2, а) и с учетом эрозионно-коррозионного износа (рис 2, б). Как следует из полученных результатов для дефекта, соответствующего утонению стенки до 35 %, не наблюдается перераспределение максимума напряжений в область локального дефекта.

Далее проводилось исследование влияния роста дефекта на напряженное состояние вблизи концентратора. Вначале дефект имеет форму сферы с равными полуосями a и b , длина которых равна 84 мм (рис 3, а), на следующем рисунке представлен дефект той же формы с полуосями a и b , увеличенной в 2 раза (рис 3, б). Существенного изменения напряженного состояния не наблюдается.

Исследовалось также увеличение дефекта по направлению оси b . Верхний край трещины имел форму эллипса с полуосями a и b . Как видно из рисунка, даже при увеличении длины оси b в 3 раза существенного изменения напряженного состояния не наблюдается (рис 3, в).



а)



б)

Рисунок 2 – Распределение напряжений в криволинейном фрагменте трубопровода: а) без дефекта; б) при наличии дефекта

Таким образом, перераспределение максимума напряжений при утонении стенки до 60 – 70 % не происходит.

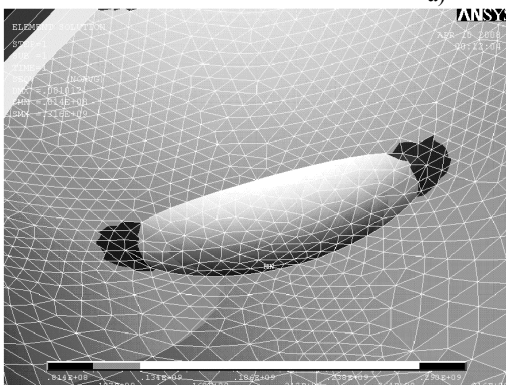
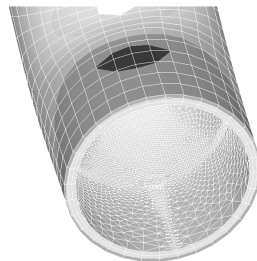
На основе полученных результатов ультразвуковой дефектоскопии и численного анализа НДС конструкции разработана методика расчета остаточного ресурса при многоцикловой усталости трубопроводов, имеющих дефекты в результате эрозионно-коррозионного износа. При расчете учитывается статистический разброс пульсации давления в системе и геометрических размеров экспериментально обнаруженных дефектов (рис. 1).

Для прогнозирования остаточного ресурса трубопровода, содержащего локальные дефекты, рассматривается линейная модель накопления усталостных повреждений [4].

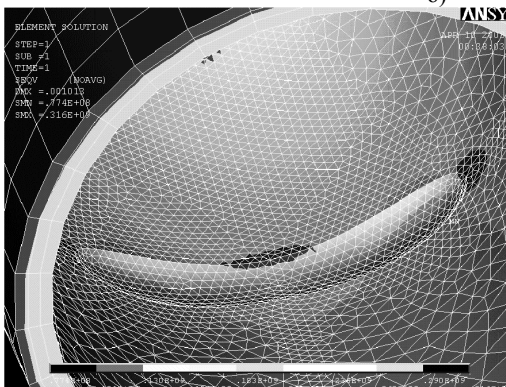
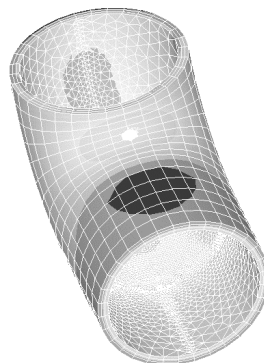
$$\frac{dz}{dt} = \frac{\sigma_a^m(t)}{T\sigma_{-1K}^m N_0}, \quad (1)$$



a)



б)



в)

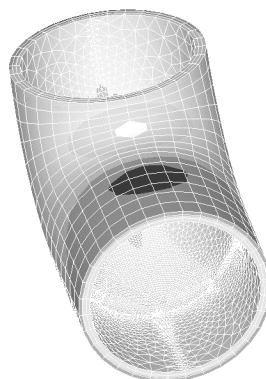


Рисунок 3 – Распределение напряжений в криволинейном фрагменте трубопровода: а) дефект сферической формы с полуосями $a = b = 0,084$ м; б) дефект эллиптической формы полуосями $b = 1,4 a$; в) увеличение дефекта по направлению полуоси $b = 3a$

$$m_{i_0} = (m_{h_1} - h_0 + vt_1)/v; \quad (5)$$

где σ_{-1k} , N_0 , m – параметры кривой усталости; T – эффективный период нагружения; $\sigma_a(t)$ – эквивалентная амплитуда напряжений в опасной зоне, подверженной эрозионно-коррозионному износу.

Предполагается $\sigma_a(t)$ прямо пропорциональна давлению в трубопроводе P и обратно пропорциональна его толщине $h(t)$ в опасной зоне

$$\sigma_a(t) = K \frac{P}{h(t)}. \quad (2)$$

Коэффициент пропорциональности K определяется по результатам решения вышеописанной задачи расчета НДС фрагмента трубопровода, содержащего локальный дефект. Предполагается, что $h(t)$ – является нестационарной линейной случайной функцией времени

$$h(t) = \begin{cases} h_0; & t < t_0, \\ h_0 - v(t - t_0); & t \geq t_0, \end{cases} \quad (3)$$

где v – скорость износа, t_0 – момент зарождения дефекта.

При обнаружении дефекта в момент времени t_1 толщина стенки в локальной зоне обозначается через h_1 . Погрешность измерений учитывается заданием плотности вероятности $f(h_1)$ случайной величины h_1 , которая предполагается нормальной.

По данным измерений в момент времени t_1 и выражения (3) можно записать линейное преобразование между случайными величинами t_0 и h_1 .

$$t_0 = t_1 - \frac{(h_0 - h_1)}{v}. \quad (4)$$

Поскольку преобразование (4) является линейным, то плотность вероятности $f(t_0)$, также подчиняется нормальному закону с математическим ожиданием m_{t_0} и дисперсией $\sigma_{t_0}^2$.

$$\sigma_{t_0}^2 = \sigma_{h_1}^2 / v^2. \quad (6)$$

Интегрируя выражение (1) в пределах $[0, t]$ с учетом выражений (2) и (3), получаем

$$z(t) = P^m F(t, t_0), \quad (7)$$

где

$$F(t, t_0) = \frac{1}{T \sigma_{-1k}^m N_0} \left[t_0 h_0^{-m} - \frac{1}{v(1-m)} \left((h_0 - v(t - t_0))^{1-m} - h_0^{1-m} \right) \right].$$

Выражение (7) позволяет определить условную плотность вероятности меры повреждений $z(t)$ в момент времени t , при условии, что зарождение дефекта началось в момент времени t_0 в функциональном преобразовании (7) учитывается, что плотность вероятности случайной величины P подчиняется нормальному закону.

Предлагается кусочно-постоянная аппроксимация зависимости толщины стенок трубопровода от времени. Поэтому соотношение (1) для i -го проме-

жутка времени эксплуатации можно записать в следующем виде:

$$z_i = N_i \frac{\sigma_{ai}^m}{\sigma_{-1ki}^m N_0}, \quad (i = \overline{1, k}). \quad (8)$$

Здесь σ_{-1ki} – предел выносливости конструкции для i -го промежутка времени, σ_{ai} – максимальное напряжение в элементе трубопровода. Для простоты индекс i отбросим.

Предел выносливости детали определяется из следующего соотношения [5]:

$$\sigma_{-1k} = \sigma_{-1} / K_{\sigma D}. \quad (9)$$

Здесь σ_{-1} – предел выносливости стандартного образца, а $K_{\sigma D}$ определяется по следующей формуле:

$$K_{\sigma D} = \alpha_{\sigma} / \left[0,5 \left[1 + \left(\frac{1}{88,3} \frac{L}{G} \right)^{-\nu \sigma} \right] + \frac{1}{\beta} - 1 \right], \quad (10)$$

где L – периметр сечения, в котором наблюдается концентрация напряжений, α_{σ} – коэффициент концентрации, β – коэффициент, зависящий от материала, G – градиент максимальных напряжений:

$$G = \frac{1}{\sigma_{\max}} \frac{\sigma_{\max} - \sigma}{a - a_0}. \quad (11)$$

Здесь σ_{\max} – максимальное напряжение в области концентрации, σ – значение напряжения в точке, находящейся на малом расстоянии от точки с максимальным напряжением, $a - a_0$ – разность координат точек, в которых находятся напряжения.

Зная предел выносливости элемента трубопровода, можно найти повреждаемость. Число циклов до разрушения определяется из следующего соотношения:

$$[N_0]_i = N_0 \sigma_{-1di}^m / \sigma_{ai}^m, \quad (12)$$

где $N_0 = 2 \cdot 10^6$.

Повреждаемость на i -м промежутке времени будет находиться согласно следующей формуле:

$$a_i = N_i / [N_0]_i. \quad (13)$$

Для k пусков суммарная повреждаемость при линейной гипотезе будет выражаться следующей зависимостью:

$$a_k = \sum_{i=1}^k a_i = \sum_{i=1}^k N_i / [N_0]_i. \quad (14)$$

Остаточный ресурс трубопровода определяется через запас по повреждаемости $z = 1 - a$ и среднегодовую повреждаемость $a_c = (1/[N_0]_1 + 1/[N_0]_k) / 2$. Тогда остаточный ресурс трубопровода составит

$$r_{\text{ост}} = z / a_c. \quad (15)$$

Рассмотрим главный циркуляционный трубопровод АЭС, в котором глубина дефекта составляет 1,8 мм. Для данного трубопровода доминируют нор-

мальные напряжения, которые существенно превышают касательные. Зависимость нормального меридиального напряжения σ_x от координаты узла представлена на рис. 4.

Как видно из графика, напряжения распределяются симметрично относительно оси трубы. Максимальные напряжения наблюдаются на дне углубления, то есть в области наибольшего утонения стенок трубопровода.

Аналогичная зависимость нормального окружного напряжения σ_z представлена на рис. 5. На рис. 6, 7 показаны распределения напряжений σ_y и τ_{yz} .

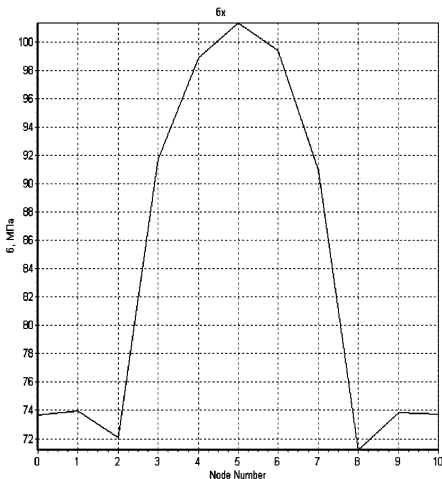


Рисунок 4 – Распределение напряжения σ_x в области дефекта ($\sigma_{\max} = 101,33$ МПа)

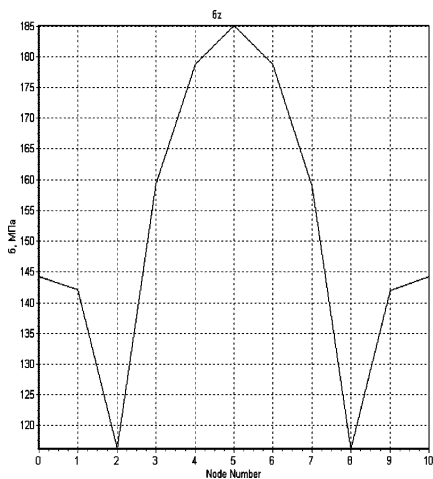


Рисунок 5 – Распределение напряжения σ_z в области дефекта ($\sigma_{\max} = 185,07$ МПа)

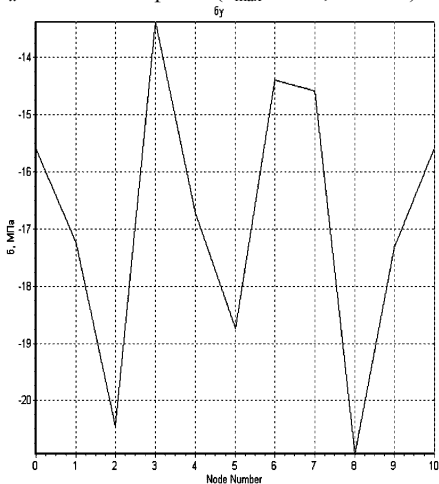


Рисунок 6 – Распределение напряжения σ_y в области дефекта ($\sigma_{\max} = 21$ МПа)

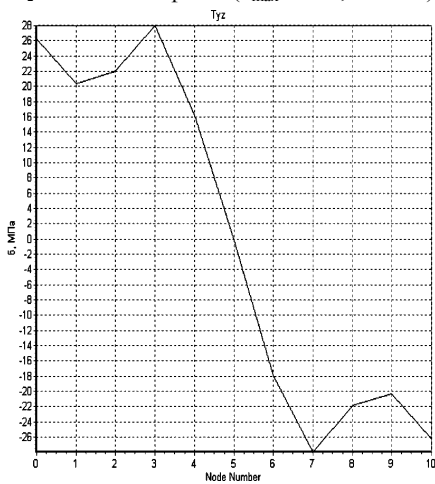


Рисунок 7 – Распределение напряжения τ_{yz} в области дефекта ($\sigma_{\max} = 28$ МПа)

В качестве эквивалентной амплитуды напряжений в соотношении (1) берется σ_z . Из приведенных графиков следует, что наиболее значимыми являются нормальные окружные напряжения σ_z , для которых и вычисляется градиент напряжений.

Нахождение номинальных напряжений производится путем осреднения арифметических значений напряжений, находящихся вне области концентрации. Коэффициент концентрации вычисляется как отношение максимального напряжения к номинальному.

Для средних номинальных $\sigma_{ном} = 116,24$ МПа и максимальных напряжений $|\sigma_{max}| = 185,07$ МПа, коэффициент концентрации $\alpha_\sigma = 1,59$.

Для рассматриваемого трубопровода:

$$\sigma_{max} = 159,27 \text{ МПа}; \quad \sigma = 116,31 \text{ МПа}; \quad \alpha = 0,014 \text{ м}; \quad a_0 = 0,021 \text{ м};$$

$$L = 2\pi (r_1 + r_2) = 3,14 \cdot (560 + 560 - 34) = 3,41 \text{ м}.$$

Из соотношения (11) находится градиент напряжений: $G = 38,68$.

Из выражения (10) суммарный коэффициент концентрации равен $K_{\sigma D} = 1,2$, а предел выносливости всей конструкции в соответствии с формулой (9): $\sigma_{-1k} = 133,4$.

В табл. 2 представлена зависимость числа циклов до разрушения от толщины стенки трубопровода в области концентрации.

Таблица 2 – Зависимость числа циклов от глубины дефекта

№	h_i , мм	N_{0i} , циклов	№	h_i , мм	N_{0i} , циклов
1	1,8	8515	9	4,2	225
3	2,4	1946	11	4,8	151
5	3,0	832	13	5,4	113
7	3,6	432	15	6,0	96

Рассмотрим частный случай, при котором осуществлялось 10 пусков в году. Рассматривается временной промежуток, в котором предполагается постоянное значение предела выносливости, равный 1 году. Повреждаемость на первом временном участке, согласно формуле (13), равна $a_1 = 0,00117$. Суммарная повреждаемость определяется из соотношения (14): $a = 0,63$. Запас повреждаемости будет равен $z = 0,37$, а среднегодовая повреждаемость $a_c = 0,05$. Тогда остаточный ресурс трубопровода составит $r_{ост} \approx 7$ лет согласно соотношению (15).

Таким образом, на основе проведенных численных исследований была разработана методика расчета остаточного ресурса при многоцикловой усталости трубопроводов, имеющих дефекты в результате эрозионно-коррозионного износа. Также рассматривался частный случай расчета остаточного ресурса, при котором предлагалась кусочно-постоянная аппроксимация зависимости толщины стенки трубопровода в области дефекта от времени. Предполагалась линейная гипотеза накопления усталостных повреждений. Было установлено, что максимальные напряжения возникают в областигиба трубопровода, однако, как показали расчеты, более опасной с точки зрения накопления усталостных повреждений оказалась область дефекта.

Список литературы: 1. *Гетьман А.Ф.* Ресурс эксплуатации сосудов и трубопроводов атомных электростанций. – М.: Энергоатомиздат, 2000. – 427 с. 2. *Белоцерковский А.Б., Жовдак В.А., Левашов В.А., Трубаев А.И.* Разработка математических моделей для диагностики трубопроводов с учетом случайного нагружения // Материалы 3 международной конференции «Динамика трубопроводов». – Москва, 2001. 3. *Полищук С.М., Манузин А.А.* Анализ исследований эрозионно-коррозионного износа трубопроводов АЭС // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 1/3(25). – 2007. – С. 3–7. 4. *Болотин В.В.* прогнозирование ресурса машин и конструкций. – М.: Машиностроение, 1984. – 312 с. 5. *Когаев В.П., Махутов Н.А., Гусенков А.П.* Расчеты деталей машин и конструкций на прочность и долговечность: Справочник – М.: Машиностроение, 1985 – 224 с.

Поступила в редколлегию 18.07.2008.