

УДК 539.3: 621.18: 621.039

**Ю.В. РОМАШОВ**, канд. техн. наук; доц. НТУ «ХПИ»

## МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ РЕСУРСА ЭКСПЛУАТАЦИИ И ПОКАЗАТЕЛЕЙ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ ТЕПЛОВЫХ И ЯДЕРНЫХ ЭНЕРГОУСТАНОВОК

Предложен метод определения ресурса эксплуатации и показателей долговечности элементов конструкций тепловых и ядерных энергоустановок. Основу метода составляет математическое моделирование процессов деформирования и повреждаемости элементов конструкций для определения ресурса при заданных эксплуатационных воздействиях, результаты которого обрабатываются при помощи методов теории вероятностей для определения вероятностных показателей долговечности.

**Ключевые слова:** ресурс, показатели долговечности, гамма-процентный ресурс, средний ресурс, теплообменные трубы тепловых и ядерных энергоустановок, ползучесть, повреждаемость.

**Ведение.** Ресурс и показатели долговечности элементов конструкций тепловых и ядерных энергоустановок определяются эксплуатационными воздействиями, которые часто не отвечают проектным режимам [1, 2]. Определение ресурса и показателей долговечности является в настоящее время актуальной научной проблемой, связанной с важными научно-техническими задачами по обеспечению длительной эксплуатации и повышению надежности тепловых и ядерных энергоустановок [1].

**Анализ исследований и публикаций.** Эксплуатационные воздействия приводят к разнообразным повреждениям материала элементов конструкций тепловых и ядерных энергоустановок [2–5], для которых актуальны оценки ресурса эксплуатации в виде наработок, в течение которых предельное состояние не будет достигаться с заданной вероятностью [1, 6]. Вероятностными методами механики разрушения исследуется надежность парогенераторов ПГВ-1000М [2], относящегося к основному оборудованию реакторного отделения энергоблоков ВВЭР-1000, которыми оснащены большинство АЭС Украины. Оценка долговечности в работе [7] сведена к решению стохастических дифференциальных уравнений. В работе [8] показатели долговечности теплообменных труб парогенераторов АЭС определяются по плотности распределения времени их коррозионного растрескивания. Для теплообменных труб пароперегревателей паровых котлов ТЭС показатели долговечности определены по плотности распределения времени коррозионного растрескивания с учетом ползучести [9].

**Формулировка целей исследования.** Целью данного исследования, является разработка метода определения ресурса эксплуатации и показателей долговечности элементов конструкций тепловых и ядерных энергоустановок. Основой метода является математическое моделирование деформирования и повреждаемости элементов конструкций для определения ресурса при заданных эксплуатационных воздействиях и последующая обработка результатов такого моделирования на основе подходов теории вероятности для определения вероятностных показателей долговечности.

**1 Текущее и предельное состояния элементов конструкций.** Представляем элемент конструкции деформируемым твердым телом, которое в момент времени  $t = 0$  занимает объем  $Y \subset R^3$  с граничной поверхностью  $v \subset R^2$ . Положение точки тела определяем радиус-вектором  $\vec{r} \in Y$ . Состояние термо-упругого деформирования тела характеризуем вектором  $\mathbf{u}^{(1)}(\vec{r}, t)$ , с компонентами в виде температуры, перемещений, деформаций, напряжений. Со временем в материале тела накапливаются приводящие в

© Ю.В. Ромашов, 2013

точке  $\vec{r} = \vec{r}^*$  тела к образованию локального макроскопического дефекта (трещины) в момент времени  $t = t^*$  множественные микроскопические дефекты, характеризующиеся вектором  $\mathbf{u}^{(2)}(\vec{r}, t)$ , с компонентами в виде необратимых деформаций, параметра повреждаемости [10, 11], параметров, описывающих изменение области тела  $Y(\mathbf{u}^{(2)})$  из-за сплошной коррозии и других параметров.

Ограничимся определением ресурса эксплуатации и показателей долговечности элементов конструкций с отвечающим времени  $t = t^*$  предельным состоянием. Близость состояния к предельному определяем параметрами  $\xi_i(\mathbf{u}^{(1)}, \mathbf{u}^{(2)})$ ,  $0 \leq \xi_i \leq 1$ ,  $i = 1, 2, \dots, N_{(\xi)}$ , значения  $\xi_i = 0$  которых отвечают состоянию в момент времени  $t = 0$ , а  $\xi_i = 1$  – предельному состоянию при нарушении одного из условий нормальной эксплуатации. Примерами таких условий служат равенства единице параметра повреждаемости или отношения интенсивности деформации ползучести к ее допускаемому значению. С учетом этого, условие достижения телом предельного состояния представим в виде:

$$\exists \vec{r}^* \in Y, t^* > 0 : \max_{i \in I} \xi_i(\mathbf{u}^{(1)}(\vec{r}^*, t^*), \mathbf{u}^{(2)}(\vec{r}^*, t^*)) = 1, \quad I = \{1, 2, 3, \dots, N_{(\xi)}\}. \quad (1)$$

Условием (1) определяется как время  $t^*$  достижения предельного состояния, так и место расположения  $\vec{r}^*$  образовавшегося макроскопического дефекта.

**2 Определение ресурса эксплуатации элементов конструкций.** Ресурс эксплуатации оцениваем временем  $t^*$ , которое определяется из условия (1) векторами  $\mathbf{u}^{(1)} = \mathbf{u}^{(1)}(\vec{r}, t)$  и  $\mathbf{u}^{(2)} = \mathbf{u}^{(2)}(\vec{r}, t)$ . Рассмотрим определение этих векторов при заданном квазистатическом эксплуатационном воздействии на элемент конструкции.

Температурное и напряженно-деформированное состояния тела, представленные вектором  $\mathbf{u}^{(1)}$ , зависят от внешних нагрузок, поврежденности материала и формы области – от вектора  $\mathbf{u}^{(2)}$ , что в самом общем виде можно представить краевой задачей

$$\mathbf{A}^{(1)}(\mathbf{u}^{(1)}; \mathbf{u}^{(2)}) = \mathbf{f}^{(1)} \quad \forall \vec{r} \in Y(\mathbf{u}^{(2)}), \quad \mathbf{L}^{(1)}(\mathbf{u}^{(1)}; \mathbf{u}^{(2)}) = \mathbf{p}^{(1)} \quad \forall \vec{r} \in \nu(\mathbf{u}^{(2)}). \quad (2)$$

Здесь  $\mathbf{A}^{(1)}(\mathbf{u}^{(1)}; \mathbf{u}^{(2)})$  – оператор и  $\mathbf{f}^{(1)}$  – заданный вектор дифференциальных уравнений,  $\mathbf{L}^{(1)}(\mathbf{u}^{(1)}; \mathbf{u}^{(2)})$  – оператор  $\mathbf{p}^{(1)}$  – заданный вектор граничных условий описывающих температурное и напряженно-деформированное состояния тела при заданных характеристиках повреждения материала – при заданном векторе  $\mathbf{u}^{(2)}$ . Зависимость от времени  $t$  определяемого из краевой задачи (2) вектора  $\mathbf{u}^{(1)}$  является неявной, следствием зависимости от времени вектора  $\mathbf{u}^{(2)}$ . Выделим два типа повреждений. Скорость повреждений первого типа не зависит от их градиента как при ползучести. Скорость повреждений второго типа зависит от их градиента, как в процессе водородной коррозии. В общем виде это можно описать начально-краевой задачей

$$\begin{aligned} \partial \mathbf{u}^{(2)} / \partial t + \mathbf{A}^{(2)}(\mathbf{u}^{(2)}; \mathbf{u}^{(1)}) &= \mathbf{f}^{(2)}(\mathbf{u}^{(2)}; \mathbf{u}^{(1)}), \quad \mathbf{u}^{(2)}(\vec{r}, 0) = \mathbf{u}_0^{(2)}(\vec{r}) \quad \forall \vec{r} \in Y(\mathbf{u}^{(2)}), \\ \mathbf{L}^{(2)}(\mathbf{u}^{(2)}; \mathbf{u}^{(1)}) &= \mathbf{p}^{(2)} \quad \forall \vec{r} \in \nu(\mathbf{u}^{(2)}), \end{aligned} \quad (3)$$

где  $\mathbf{A}^{(2)}(\mathbf{u}^{(2)}; \mathbf{u}^{(1)})$  – дифференциальный и  $\mathbf{f}^{(2)}(\mathbf{u}^{(2)}; \mathbf{u}^{(1)})$  – недифференциальный

операторы, отвечающие скоростям развития повреждений второго и первого типа;  $\mathbf{u}_0^{(2)}(\vec{r})$  – вектор, характеризующий повреждения материала при  $t = 0$ ;  $\mathbf{L}^{(2)}(\mathbf{u}^{(2)}; \mathbf{u}^{(1)})$  – оператор и  $\mathbf{p}^{(2)}$  – вектор, отвечающие граничным условиям для вектора  $\mathbf{u}^{(2)}$ .

Определение ресурса эксплуатации при заданных воздействиях, представленных в векторах  $\mathbf{f}^{(1)}$ ,  $\mathbf{p}^{(1)}$  и  $\mathbf{p}^{(2)}$ , сводится к решению связанных краевой задачи (2) и начально-краевой задачи (3) до момента времени  $t = t^*$ , устанавливаемого условием (1). Задачу (2), (3) приходится решать численно, для чего можно использовать метод Бубнова-Галеркина [12] или взвешенных невязок [13]. Для этого представим искомые решения аппроксимациями по заданным системам пробных функций координат радиус-вектора  $\vec{r}$ , с коэффициентами аппроксимаций – функциями времени  $t$ :

$$\mathbf{u}^{(1)}(\vec{r}, t) = \mathbf{u}_v^{(1)}(\vec{r}) + \mathbf{U}^{(11)}(\vec{r}) \cdot \mathbf{a}^{(1)}(t) + \mathbf{U}^{(12)}(\vec{r}) \cdot \mathbf{a}^{(2)}(t), \mathbf{u}^{(2)}(\vec{r}, t) = \mathbf{u}_v^{(2)}(\vec{r}) + \mathbf{U}^{(22)}(\vec{r}) \cdot \mathbf{a}^{(2)}(t). \quad (4)$$

где  $\mathbf{u}_v^{(1)}(\vec{r})$ ,  $\mathbf{u}_v^{(2)}(\vec{r})$  – векторы, продлевающие заданные граничные значения внутрь исследуемой области;  $\mathbf{U}^{(11)}(\vec{r})$ ,  $\mathbf{U}^{(12)}(\vec{r})$ ,  $\mathbf{U}^{(22)}(\vec{r})$  – матрицы, составленные из пробных функций;  $\mathbf{a}^{(1)}(t)$ ,  $\mathbf{a}^{(2)}(t)$  – векторы, составленные из коэффициентов аппроксимаций, из которых  $\mathbf{a}^{(1)}(t)$ , не содержится в аппроксимации вектора  $\mathbf{u}^{(2)}$ .

Граничные условия задачи (2), (3) удовлетворим за счет выбора векторов  $\mathbf{u}_v^{(1)}$ ,  $\mathbf{u}_v^{(2)}$ , и содержащихся в матрицах  $\mathbf{U}^{(11)}$ ,  $\mathbf{U}^{(12)}$ ,  $\mathbf{U}^{(22)}$  пробных функций. Это можно сделать приближенно с использованием локальных, например, конечно-элементных, аппроксимаций с коэффициентами в виде узловых значений [13]. Можно использовать также методы теории  $R$ -функций [14] и строить точно удовлетворяющие граничным условиям (2), (3) аппроксимации (4) для областей сложной формы. Векторы  $\mathbf{a}^{(1)}$ ,  $\mathbf{a}^{(2)}$  определим так, чтобы аппроксимации (4) приближенно удовлетворяли также и дифференциальным уравнениям задачи (2), (3). Для этого воспользуемся методом Бубнова-Галеркина, как в работе [12], и получим соотношения:

$$\mathbf{A}_n^{(1)}(\mathbf{a}^{(1)}, \mathbf{a}^{(2)}) = \mathbf{f}_n^{(1)}(\mathbf{a}^{(2)}), \quad (5)$$

$$\mathbf{K}_n(\mathbf{a}^{(2)}) \cdot d\mathbf{a}^{(2)}/dt + \mathbf{A}_n^{(21)}(\mathbf{a}^{(1)}, \mathbf{a}^{(2)}) + \mathbf{A}_n^{(22)}(\mathbf{a}^{(1)}, \mathbf{a}^{(2)}) = \mathbf{f}_n^{(2)}(\mathbf{a}^{(1)}, \mathbf{a}^{(2)}). \quad (6)$$

Алгебраические выражения в векторах  $\mathbf{A}_n^{(1)}(\mathbf{a}^{(1)}, \mathbf{a}^{(2)})$  и  $\mathbf{f}_n^{(1)}(\mathbf{a}^{(2)})$  – это конечномерные аппроксимации оператора  $\mathbf{A}^{(1)}(\mathbf{u}^{(1)}; \mathbf{u}^{(2)})$  и вектора  $\mathbf{f}^{(1)}$  дифференциальных уравнений (2), отвечающие числу  $n$  пробных функций в аппроксимациях (4). Аналогично выражение  $\mathbf{K}_n(\mathbf{a}^{(2)}) \cdot d\mathbf{a}^{(2)}/dt$ , векторы  $\mathbf{A}_n^{(21)}(\mathbf{a}^{(1)}, \mathbf{a}^{(2)})$ ,  $\mathbf{A}_n^{(22)}(\mathbf{a}^{(1)}, \mathbf{a}^{(2)})$  и  $\mathbf{f}_n^{(2)}(\mathbf{a}^{(1)}, \mathbf{a}^{(2)})$  – конечномерные аппроксимации операторов  $\partial \mathbf{u}^{(2)}/\partial t$ ,  $\mathbf{A}^{(2)}(\mathbf{u}^{(2)}; \mathbf{u}^{(1)})$  и  $\mathbf{f}^{(2)}(\mathbf{u}^{(2)}; \mathbf{u}^{(1)})$  дифференциальных уравнений (3). Соотношения (5), (6) рассматриваем как уравнения для определения коэффициентов аппроксимаций. Вначале разрешаем уравнения (5):

$$\mathbf{a}^{(1)} = \mathbf{a}^{(1)}(\mathbf{a}^{(2)}), \quad \mathbf{a}^{(1)}(\mathbf{a}^{(2)}) = \overline{\mathbf{A}}_n^{(1)}(\mathbf{a}^{(2)}, \mathbf{f}_n^{(1)}(\mathbf{a}^{(2)})). \quad (7)$$

Здесь оператор  $\overline{\mathbf{A}}_n^{(1)}(\mathbf{a}^{(2)}, \mathbf{f}_n^{(1)}(\mathbf{a}^{(2)}))$  такой, что  $\mathbf{A}_n^{(1)}(\overline{\mathbf{A}}_n^{(1)}(\mathbf{a}^{(2)}, \mathbf{f}_n^{(1)}(\mathbf{a}^{(2)})), \mathbf{a}^{(2)}) \equiv \mathbf{f}_n^{(1)}(\mathbf{a}^{(2)})$ . В виде соотношения (7) символически представлено решение краевой задачи (2) при

заданных характеристиках множественных микродефектов в материале. Далее при помощи соотношения (7) исключаем вектор  $\mathbf{a}^{(1)}$  из дифференциальных уравнений (6):

$$d\mathbf{a}^{(2)}/dt = \bar{\mathbf{f}}_n^{(2)}(\mathbf{a}^{(2)}),$$

$$\bar{\mathbf{f}}_n^{(2)}(\mathbf{a}^{(2)}) = (\mathbf{K}_n(\mathbf{a}^{(2)}))^{-1} \cdot (\mathbf{f}_n^{(2)}(\mathbf{a}^{(1)}(\mathbf{a}^{(2)}), \mathbf{a}^{(2)}) - \mathbf{A}_n^{(21)}(\mathbf{a}^{(1)}(\mathbf{a}^{(2)}), \mathbf{a}^{(2)}) - \mathbf{A}_n^{(22)}(\mathbf{a}^{(1)}(\mathbf{a}^{(2)}), \mathbf{a}^{(2)})). \quad (8)$$

Вектор  $\mathbf{a}^{(2)}$  в момент времени  $t = 0$  определяем при помощи начального условия задачи (3), которое удовлетворяем приближенно при помощи метода наименьших квадратов, который с учетом второго выражения (4) примет вид

$$S(\mathbf{a}^{(2)}) = \int_{Y(\mathbf{u}_0^{(2)})} (\mathbf{u}_0^{(2)} + \mathbf{U}^{(22)} \cdot \mathbf{a}^{(2)} - \mathbf{u}_0^{(2)})^2 dY \rightarrow \min \Rightarrow dS/d\mathbf{a}^{(2)} = \mathbf{0}. \quad (9)$$

Условие (9) содержит систему линейных алгебраических уравнений для определения вектора  $\mathbf{a}^{(2)}$  в момент времени  $t = 0$ . Таким образом, решение задачи (2), (3) сведено к интегрированию обыкновенных дифференциальных уравнений (8) с учетом начальных условий, получаемых из (9). Интегрирование выполняется до выполнения условия (1), которое позволяет определить ресурс эксплуатации  $t^*$ . Вид аппроксимаций (4) не имеет принципиального значения для определения ресурса эксплуатации, а влияет лишь на погрешность его приближенного вычисления в рамках принятого метода решения, которую можно сделать малой увеличением числа  $n$  пробных функций. Выбор метода численного интегрирования уравнений (8) также не принципиален и определяется лишь машинным временем, необходимым для получения решения требуемой точности. Пошаговые численные методы типа Рунге-Кутты и Мерсона [15] требуют только вычисления правой части уравнения (8).

**3 Определение показателей долговечности элементов конструкций.** Пусть время  $t^*$  – случайная величина с плотностью распределения  $f(t^*)$ . Тогда показатели долговечности элемента конструкции можем определить следующим образом [1, 6]:

$$t_\gamma : \int_0^{t_\gamma} f(t^*) dt^* = 1 - \frac{\gamma}{100}, \quad \langle t^* \rangle = \int_0^\infty t^* f(t^*) dt^*. \quad (10)$$

Здесь  $\gamma$  – процентный ресурс  $t_\gamma$  – время, за которое предельное состояние не будет достигнуто с процентной вероятностью  $\gamma$ , и средний ресурс  $\langle t^* \rangle$  – математическое ожидание времени до достижения предельного состояния [1, 6]. Пусть параметры  $z_k(t)$ ,  $k = 1, 2, \dots, N$  характеризуют эксплуатационные воздействия на элемент конструкции:

$$\mathbf{f}^{(1)} = \mathbf{f}^{(1)}(z_1, z_2, \dots, z_N), \quad \mathbf{p}^{(1)} = \mathbf{p}^{(1)}(z_1, z_2, \dots, z_N), \quad \mathbf{p}^{(2)} = \mathbf{p}^{(2)}(z_1, z_2, \dots, z_N). \quad (11)$$

Эти параметры могут представлять температуру, давление рабочих сред. Подставим соотношения (11) в уравнения (2), (3) и, численно решая эти уравнения для заданных параметров  $z_k(t)$ , определим соответствующий параметрам  $z_k(t)$  ресурс эксплуатации:

$$t^* = t^*(z_1(t), z_2(t), \dots, z_N(t)). \quad (12)$$

Если значения параметров  $z_k$  сложно прогнозировать, то считаем их случайными функциями времени и представляем каноническими разложениями [16]

$$z_k(t) = Z_{k0}(t) + \sum_{i=1}^Q z_{ki} Z_{ki}(t), \quad k = 1, 2, \dots, N. \quad (13)$$

Здесь  $Z_{k0}(t)$  – математическое ожидание функции  $z_k(t)$ ;  $Q$  – число базисных функций и  $Z_{ki}(t)$  – базисные функции;  $z_{ki}$  – некоррелированные случайные величины с равными нулю математическими ожиданиями. Подстановка разложений (13) в соотношение (12), позволяет получить время  $t^*$  как функцию случайных аргументов – коэффициентов  $z_{ki}$ :

$$t^* = t^*(z_{11}, z_{12}, \dots, z_{1Q}, \dots, z_{N1}, z_{N2}, \dots, z_{NQ}). \quad (14)$$

Обозначим  $\zeta_{ki} = \zeta_{ki}(z_{ki})$ ,  $k = 1, 2, \dots, N$ ,  $i = 1, 2, \dots, Q$  плотности распределения случайных величин  $z_{ki}$ , которые можно определить по опыту эксплуатации энергоустановок и использовать с поправками для расчетов энергоустановок сопоставимой конструкции и мощности. Плотность распределения системы случайных величин  $z_{ki}$  [16]:

$$\zeta = \zeta(z_{11}, z_{12}, \dots, z_{1Q}, \dots, z_{N1}, z_{N2}, \dots, z_{NQ}) = \prod_{k=1}^N \prod_{i=1}^Q \zeta_{ki}(z_{ki}). \quad (15)$$

Используя (15), определим плотность распределения времени (14) [16]:

$$f(t^*) = dF(t^*)/dt^*, \quad F(t^*) = \int \int \dots \int \int_{D(t^*)} \zeta(z_{11}, z_{12}, \dots, z_{ki}, \dots, z_{NQ}) dz_{11} dz_{12} \dots dz_{ki} \dots dz_{NQ}. \quad (16)$$

Здесь  $D(t^*)$  – область значений параметров  $z_{ki}$ , для которых время (14) удовлетворяет условию  $t^*(z_{11}, \dots, z_{NQ}) < t^*$ . Если эксплуатационные воздействия характеризуются одним параметром с одной базисной функцией в каноническом разложении, то время (14) будет функцией одного случайного аргумента

$$t^* = t^*(z_{11}). \quad (17)$$

Для времени (17) плотность распределения (16) можем получить в явном виде [16]:

$$f(t^*) = \zeta_{11}(z_{11}(t^*)) |dz_{11}(t^*)/dt^*|. \quad (18)$$

где учтено, что функция (17) монотонная;  $z_{11} = z_{11}(t^*)$  – обратная к (17) функция.

**4 Показатели долговечности эксплуатирующихся в условиях ползучести теплообменных труб тепловых и ядерных энергоустановок.** Теплообменные трубы, под внутренним и наружным давлениями, широко используются в тепловых и ядерных энергоустановках; из-за высоких температур они подвержены ползучести. Представим теплообменную трубу как бесконечно длинный однородный изотропный цилиндр с внутренним радиусом  $r_1$  и наружным радиусом  $r_2$  в однородном температурном поле

под внутренним и наружным давлениями  $p_1$  и  $p_2$ . Напряженно-деформированное состояние цилиндра характеризуется, зависящими из-за осевой симметрии только от радиальной координаты  $r_1 \leq r \leq r_2$  и времени  $t \geq 0$ , радиальным перемещением  $u_r(r, t)$ , радиальным  $\sigma_{rr}(r, t)$  и окружным  $\sigma_{\theta\theta}(r, t)$  напряжениями. Полные деформации складываются из необратимых деформаций ползучести  $c_{rr}(r, t)$ ,  $c_{\theta\theta}(r, t)$  и обратимых термоупругих деформаций. Температурные деформации пропорциональны изменению  $\Delta T$  температуры относительно исходного состояния, а упругие – связаны с напряжениями законом Гука [9, 12]. Краевая задача о напряженно-деформированном состоянии трубы с учетом ползучести может быть представлена в виде [9, 12]:

$$-\frac{1}{E}\sigma_{rr} + \frac{\nu}{E}\sigma_{\theta\theta} + \frac{\partial u_r}{\partial r} - c_{rr} = \alpha\Delta T, \quad -\frac{1}{E}\sigma_{\theta\theta} + \frac{\nu}{E}\sigma_{rr} + \frac{u_r}{r} - c_{\theta\theta} = \alpha\Delta T, \\ \frac{\partial \sigma_{rr}}{\partial t} + \frac{\sigma_{rr} - \sigma_{\theta\theta}}{r} = 0, \quad \sigma_{rr}(r_1, t) = -p_1, \quad \sigma_{rr}(r_2, t) = -p_2. \quad (19)$$

где  $E$ ,  $\nu$  и  $\alpha$  – модуль упругости, коэффициенты Пуассона и теплового расширения.

Входящие в уравнения (19) деформации ползучести определяем на основе теории ползучести инкрементального типа с учетом параметра повреждаемости  $\omega(r, t)$  [9, 10, 12]:

$$\frac{\partial c_{rr}}{\partial t} = \frac{3}{2} \frac{B\sigma_{eq}^{n-1}}{(1-\omega)^n} \left( \frac{2}{3}\sigma_{rr} - \frac{1}{3}\sigma_{\theta\theta} \right), \quad \frac{\partial c_{\theta\theta}}{\partial t} = \frac{3}{2} \frac{B\sigma_{eq}^{n-1}}{(1-\omega)^n} \left( \frac{2}{3}\sigma_{\theta\theta} - \frac{1}{3}\sigma_{rr} \right), \quad \frac{\partial \omega}{\partial t} = A \left( \frac{\sigma_{eq}}{1-\omega} \right)^k, \\ c_{rr}(r, 0) = 0, \quad c_{\theta\theta}(r, 0) = 0, \quad \omega(r, 0) = 0. \quad (20)$$

где  $\sigma_{eq} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_{\theta\theta} - \sigma_{rr})^2 + \sigma_{rr}^2 + \sigma_{\theta\theta}^2}$  – эквивалентное напряжение, которое, в частности,

как в данном случае, может совпадать с интенсивностью напряжений; значения констант  $n$ ,  $B$ ,  $k$ ,  $A$ , могут быть получены обработкой экспериментальных кривых ползучести и длительной прочности материала трубы.

В качестве условия достижения предельного состояния принимаем

$$\exists r^* \in [r_1, r_2], t^* > 0: \omega(r^*, t^*) \approx 1. \quad (21)$$

Уравнения (19), (20) отвечают частному случаю обобщенных уравнений (2), (3), в котором  $\mathbf{A}^{(1)}(\mathbf{u}^{(1)}; \mathbf{u}^{(2)}) = \mathbf{A}^{(11)} \cdot \mathbf{u}^{(1)} + \mathbf{A}^{(12)} \cdot \mathbf{u}^{(2)}$ ,  $\mathbf{A}^{(2)}(\mathbf{u}^{(2)}; \mathbf{u}^{(1)}) \equiv \mathbf{0}$ , где операторы  $\mathbf{A}^{(11)}$  и  $\mathbf{A}^{(12)}$  – линейные, причем

$$\mathbf{u}^{(1)} = \begin{pmatrix} \sigma_{rr} \\ \sigma_{\theta\theta} \\ u_r \end{pmatrix}, \quad \mathbf{u}^{(2)} = \begin{pmatrix} c_{rr} \\ c_{\theta\theta} \\ \omega \end{pmatrix}, \quad \mathbf{A}^{(11)} = \begin{pmatrix} -\frac{1}{E} & \frac{\nu}{E} & \frac{\partial}{\partial r} \\ \frac{\nu}{E} & -\frac{1}{E} & \frac{1}{r} \\ \frac{\partial}{\partial r} + \frac{1}{r} & -\frac{1}{r} & 0 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{A}^{(12)} = \begin{pmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{f}^{(1)} = \begin{pmatrix} \alpha\Delta T \\ \alpha\Delta T \\ 0 \end{pmatrix},$$

$$\mathbf{f}^{(1)}(\mathbf{u}^{(2)}; \mathbf{u}^{(1)}) = \begin{pmatrix} \frac{3}{2} B \sigma_{eq}^{n-1} (1 - \omega)^{-n} \left( \frac{2}{3} \sigma_{rr} - \frac{1}{3} \sigma_{\theta\theta} \right) \\ \frac{3}{2} B \sigma_{eq}^{n-1} (1 - \omega)^{-n} \left( \frac{2}{3} \sigma_{\theta\theta} - \frac{1}{3} \sigma_{rr} \right) \\ A \sigma_{eq}^k (1 - \omega)^{-k} \end{pmatrix}.$$

Условие (21) отвечает частному случаю условия (1), в котором  $N_{(\xi)} = 1$ ,  $\xi_1(\mathbf{u}^{(1)}, \mathbf{u}^{(2)}) = \omega$ . Численное решение задачи (19), (20) можно выполнить по общей схеме (2)–(9), частная реализация которой применительно к похожей задаче подробно рассмотрена в работе [9].

Определим показатели долговечности теплообменной трубы размерами  $r_1 = 18$  мм,  $r_2 = 20$  мм, нагретой до температуры  $\Delta T = 500$  °С, нагруженной внутренним и наружным давлениями с номинальными значениями  $p_1^{\text{ном}} = 30$  МПа,  $p_2^{\text{ном}} = 10$  МПа. В качестве материала трубы примем широко используемую для изготовления элементов конструкций тепловых и ядерных энергоустановок нержавеющей хромоникелевую сталь типа 18-8 аустенитного класса [9, 12]:

$$E = 1,62 \cdot 10^5 \text{ МПа}, \nu = 0,3, \alpha = 18,4 \cdot 10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{C}, \\ n = 2,023, B = 8,859 \cdot 10^{-13} \text{ МПа}^{-n} / \text{час}, k = 12,344, A = 3,779 \cdot 10^{-33} \text{ МПа}^{-k} / \text{час}.$$

Вначале примем, что в процессе эксплуатации давление  $p_2$  не отклоняется, а давление  $p_1$  – отклоняется от номинального значения, т.е.  $N = 1$ ,  $z_1 = p_1$ . Давление  $p_1$  считаем стационарной случайной функцией  $Z_{10}(t) = p_1^{\text{ном}}$ , в каноническом разложении которой ограничимся одной базисной функцией в виде единичной константы:  $Q = 1$ ,  $Z_{11}(t) = 1$ ; коэффициентом  $z_{11}$  определяется отклонение давления  $p_1$  от номинального значения в процессе эксплуатации. Нестационарное давление  $p_1$  при этом заменяется стационарным, эквивалентным по времени  $t^*$ . Значения  $t^*$ , полученные при численном решении задач ползучести (19), (20) для разных значений давления  $p_1$ , достаточно точно (рис. 1) описываются представляющим частный вид функции (17) соотношением

$$t^*(p_1) = A \cdot p_1^{-m}, \quad A = 2,2639 \cdot 10^6 \text{ МПа}^m \cdot \text{ч}, \quad m = 21,0301. \quad (22)$$

Для плотности распределения давления  $p_1$  примем равномерный закон в пределах 10 %-ного отклонения от номинального значения, а также эквивалентный ему по математическому ожиданию и дисперсии треугольный закон (рис. 2а). Зависимость (22) и плотности распределения (рис. 2а) позволяют определить по формуле (18) плотности распределения времени  $t^*$ , которые примут вид, показанный на рис. 2б, и дадут возможность определить показатели долговечности (10) теплообменной трубы. Для равномерного и треугольного законов плотностей распределения давления  $p_1$  получены сопоставимые значения  $\langle t^* \rangle \cong 458017$  час и  $\langle t^* \rangle \cong 483696$  час среднего ресурса, а также сопоставимые значения  $t_\gamma \cong 36971$  час и  $t_\gamma \cong 32500$  час  $\gamma$ -процентного ресурса, отвечающего  $\gamma = 95$  %. Ресурс эксплуатации, отвечающий номинальному давлению  $p_1 = p_1^{\text{ном}}$ , можно получить при помощи формулы (22), что приведет к значению  $t^*(p_1^{\text{ном}}) \cong 226433$  час.

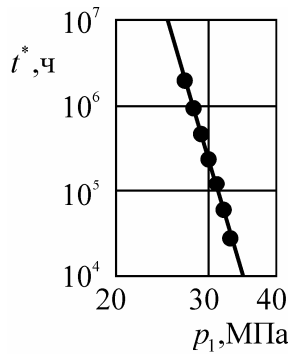


Рис. 1 – Зависимость времени  $t^*$  от давления  $p_1$  при номинальном давлении  $p_2$  в процессе эксплуатации: маркеры – решения задач ползучести; линия – аппроксимация

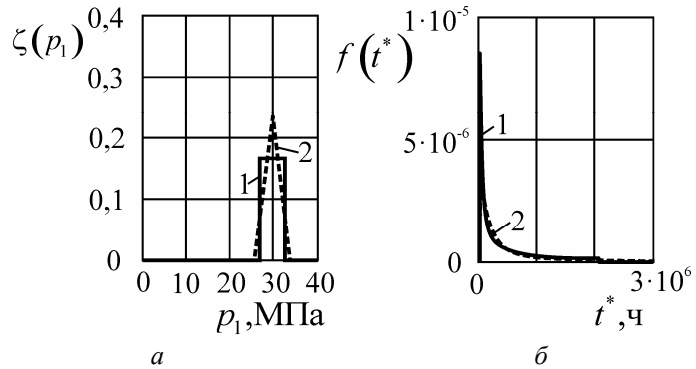


Рис. 2 – Законы плотности распределения давления  $p_1$  (а) и отвечающие им законы плотности распределения времени  $t^*$  (б) при номинальном давлении  $p_2$  в процессе эксплуатации: 1 – равномерная плотность распределения давления  $p_1$ ; 2 – треугольная плотность распределения давления  $p_1$

Пусть давление  $p_2$ , также как и  $p_1$ , может при эксплуатации отклоняться от своего номинального значения не более чем на 10 %, что отвечает случаю  $N = 2$ ,  $z_1 = p_1$ ,  $z_2 = p_2$ . Значения  $t^*$ , полученные численным решением задач ползучести (19), (20) при различных давлениях  $p_1$  и  $p_2$  (рис. 3а), хорошо описываются соотношением

$$t^*(p_1, p_2) = A(p_2) \cdot p_1^{-m(p_2)}, \quad (23)$$

Здесь  $A(p_2)$ ,  $m(p_2)$  – функции, вид которых представлен на рис. 3б. Увеличение внутреннего давления  $p_1$  приводит к уменьшению, а наружного давления  $p_2$  – к увеличению времени  $t^*$  из-за характера влияния давлений  $p_1$ ,  $p_2$  на напряженное состояние в момент времени  $t = 0$ : увеличение давления  $p_1$  приводит к увеличению, а  $p_2$  – к уменьшению максимального эквивалентного напряжения  $\sigma_{eq}$  в сечении трубы.

Для давлений  $p_1$  и  $p_2$  примем равномерный закон плотности распределения в границах интервалов 10 %-ных отклонений от номинальных значений (рис. 4). Формула (16) в этом случае примет вид

$$F(t^*) = \int_a^b \int_\alpha^\beta \zeta(p_1, p_2) \cdot D(p_1, p_2, t^*) dp_1 dp_2, \quad D(p_1, p_2, t^*) = \begin{cases} 1, & A(p_2) \cdot p_1^{-m(p_2)} \leq t^* \\ 0, & A(p_2) \cdot p_1^{-m(p_2)} > t^* \end{cases} \quad (24)$$

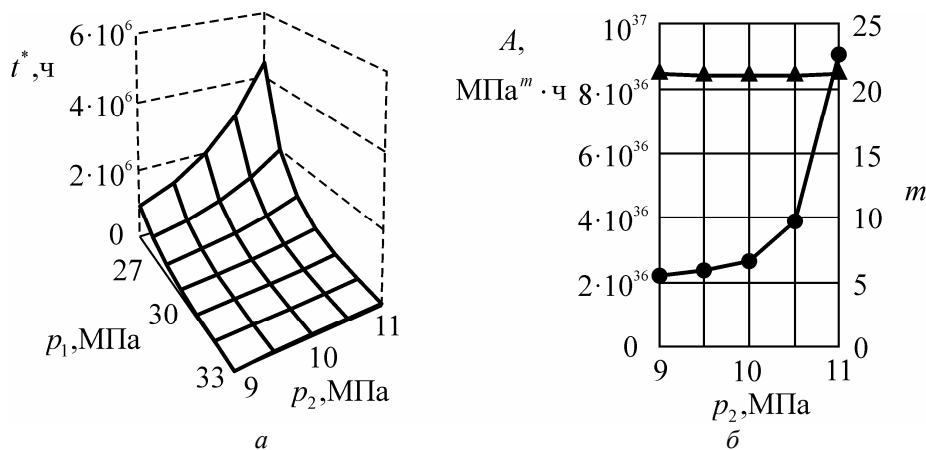


Рис. 3 – Зависимость времени  $t^*$  от давлений  $p_1$ ,  $p_2$  (а) и коэффициенты ее аппроксимации (б)  
● – коэффициент  $A$ ; ▲ – коэффициент  $m$



Здесь  $a = 27$  МПа,  $b = 33$  МПа и  $\alpha = 9$  МПа,  $\beta = 11$  МПа – границы интервалов отклонения давлений  $p_1$  и  $p_2$  (рис. 4). Функция распределения (24) времени  $t^*$  позволяет определить показатели долговечности (10). Учет отклонения давления  $p_2$  от номинального значения при эксплуатации приводит меньшему на  $\sim 30\%$  значению  $\gamma$ -процентного ресурса, отвечающего  $\gamma = 95\%$ , по сравнению со значением  $t_\gamma$  для номинального давления  $p_2$  (рис. 5).

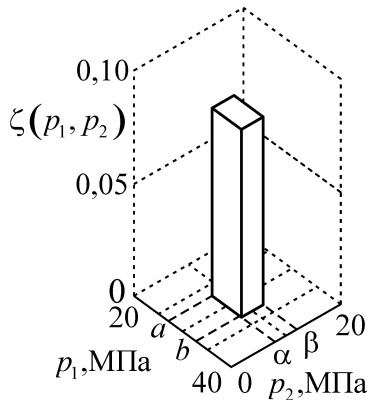


Рис. 4 – Плотность распределения давлений  $p_1, p_2$  при эксплуатации

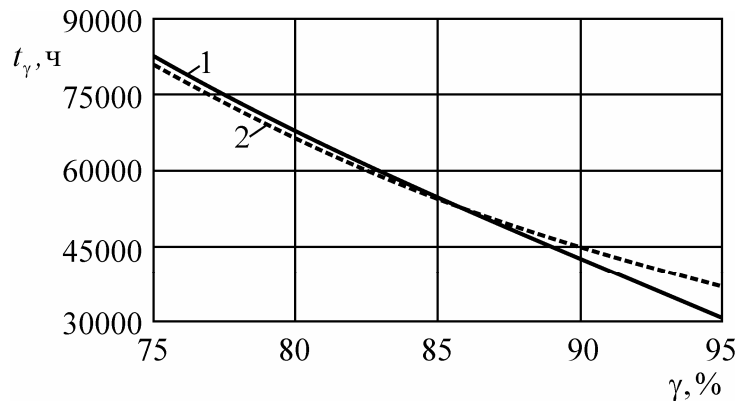


Рис. 5 – Результаты, полученные для  $\gamma$ -процентного ресурса теплообменной трубы:

- 1 – отклонения от номинального значения давлений  $p_1$  и  $p_2$ ;
- 2 – отклонения от номинального значения давления  $p_1$  при номинальном значении давления  $p_2$

**Обсуждение результатов работы.** С помощью предложенного метода для теплообменной трубы, эксплуатирующейся под внутренним и наружным давлениями при ползучести, показано, что ресурс эксплуатации при номинальных давлениях может в шесть раз превышать отвечающий  $\gamma = 95\%$   $\gamma$ -процентный ресурс, полученный с учетом отклонения давлений от номинальных значений при эксплуатации. Средний ресурс может превышать в два раза отвечающий номинальным давлениям ресурс эксплуатации и более чем в десять раз  $\gamma$ -процентный ресурс, отвечающий  $\gamma = 95\%$ , из-за большого разброса времени достижения предельного состояния при ползучести. Учет отклонений от номинальных значений большего числа параметров может приводить к худшим расчетным показателям долговечности.

**Выводы и перспективы дальнейших исследований.** Предложен метод для определения ресурса эксплуатации и показателей долговечности элементов конструкций тепловых и ядерных энергоустановок с учетом возможных отклонений от номинальных значений многих параметров, характеризующих эксплуатационные воздействия. Метод состоит в математическом моделировании деформирования и повреждаемости элементов конструкций для определения ресурса при заданных эксплуатационных воздействиях и последующей обработке результатов такого моделирования на основе подходов теории вероятностей для определения показателей долговечности –  $\gamma$ -процентного и среднего ресурсов. Как правило, наихудшую оценку долговечности дает  $\gamma$ -процентный ресурс; пренебрежение отклонениями параметров, характеризующих эксплуатационные воздействия, от номинальных значений, скорее всего, будет приводить к завышенным оценкам долговечности. Предложенный метод может использоваться в научных, проектных и эксплуатирующих организациях для оценки ресурса эксплуатации и показателей долговечности элементов конструкций

тепловых и ядерных энергоустановок на всех этапах их жизненного цикла с целью обеспечения их длительной надежной эксплуатации.

**Список литературы:** 1. *Гладышев, Г.П.* Надежность теплоэнергетического оборудования ТЭС и АЭС [Текст] / Г.П. Гладышев, Р.З. Аминов, В.З. Гуревич и др.; Под ред. А.И. Андрущенко. – М.: Высш. шк., 1991. – 303 с. 2. *Лукаевич, Б.И.* Парогенераторы реакторных установок ВВЭР для атомных электростанций [Текст] / Б.И. Лукаевич, Н.Б. Трунов, Ю.Г. Драгунов, С.Е. Давиденко. – М.: ИКЦ «Академкнига», 2004. – 391 с. 3. *Липов, Ю.М.* Котельные установки и парогенераторы [Текст] / Ю.М. Липов, Ю.М. Третьяков. – Мостка-Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2003. – 592 с. 4. *Антикайн, П.А.* Металлы и расчет на прочность котлов и трубопроводов [Текст] / П.А. Антикайн. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 368 с. 5. *Денисов, В.П.* Реакторные установки ВВЭР для атомных электростанций [Текст] / В.П. Денисов, Ю.Г. Драгунов. – М.: ИздАТ, 2002. – 480 с. 6. Надежность технических систем [Текст]: справочник / Ю.К. Беляев, В.А. Богатырев, В.В. Болотин и др.; под ред. И.А. Ушакова. – М.: Радио и связь, 1985. – 608 с. 7. *Ефлов, В.Б.* Оценка долговечности на основе модели накопления повреждений / В.Б. Ефлов // Пробл. прочности. – 2000. – № 1. – С. 151–156. 8. *Ромашов, Ю.В.* Оценка показателей долговечности теплообменных труб парогенераторов АЭС с ВВЭР на основе континуальной модели коррозионного растрескивания / Ю.В. Ромашов // Ядерна та радіаційна безпека. – 2012. – № 3(55). – С. 16-20. 9. *Ромашов, Ю.В.* Оценка показателей долговечности теплообменных труб пароперегревателей паровых котлов на основе континуальной механики разрушения / Ю.В. Ромашов // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. – 2012. – № 10(104). – С. 41-56. 10. *Работнов, Ю.Н.* Введение в механику разрушения [Текст] / Ю.Н. Работнов. – М.: Наука, 1987. – 80 с. 11. *Lemaitre, J.* Engineering Damage Mechanics: Ductile, Creep and Brittle Failures / J. Lemaitre, R. Desmorat. – Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2005. – 380 p. 12. *Ромашов, Ю.В.* Математические постановки и численное решение задач о рассеянном разрушении деформируемых твердых тел / Ю.В. Ромашов // Вестник Харьковского национального университета им. В.Н.Каразина. Серия: Математика, прикладная математика и механика. – 2011. – № 967. – С. 4-16. 13. *Флетчер, К.* Численные методы на основе метода Галеркина [Текст] / К. Флетчер. – М.: Мир, 1988. – 352 с. 14. *Рвачев, В.Л.* Теория R-функций и некоторые ее приложения [Текст] / В.Л. Рвачев. – К.: Наукова думка, 1982. – 522 с. 15. *Ланс, Дж.Н.* Численные методы для быстродействующих вычислительных машин [Текст] / Дж.Н. Ланс. – М.: Издательство иностранной литературы, 1962. – 210 с. 16. *Вентцель, Е.С.* Теория вероятностей [Текст] / Е.С. Вентцель. – М.: Наука, 1969. – 576 с.

*Поступила в редколлегию 15.02.13*

УДК 539.3: 621.18: 621.039

**Метод определения ресурса эксплуатации и показателей долговечности элементов конструкций тепловых и ядерных энергоустановок** [Текст] / Ю.В. Ромашов // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – Х.: НТУ «ХПІ», 2013. – № 14(988). – С. 62-71. – Бібліогр.: 16 назв. – ISSN 2078-774X.

Запропоновано метод визначення ресурсу експлуатації та показників довговічності елементів конструкцій теплових та ядерних енергоустановок. Основою методу є математичне моделювання деформування та пошкоджуваності елементів конструкцій для визначення ресурсу, що відповідає заданим експлуатаційним впливам, та обробка його результатів за допомогою теорії імовірності для визначення імовірнісних показників довговічності.

**Ключові слова:** ресурс, показники довговічності, гама-відсотковий ресурс, середній ресурс, теплообмінні труби теплових та ядерних енергоустановок, повзучість, пошкоджуваність.

The method for determining operation life and durability indexes of structural elements of heat and nuclear power plants is proposed. The method is based on the mathematical modelling of the deformation and damage of structural elements to determine operation life for a given operating conditions, the results of which are handled by the methods of the theory of probability to determine the probability durability indexes.

**Keywords:** useful life, durability measures, gamma-percentile life, mean life, heat exchanger tubes of the heat and nuclear power plants, creep, damage.