

УПРАВЛЕНИЕ РЕСУРСОМ ОБОРУДОВАНИЯ АЭС В УСЛОВИЯХ СТАРЕНИЯ МЕТОДАМИ СИСТЕМНОГО АНАЛИЗА ДАННЫХ

О.М. Гулина, Н.Л. Сальников, В.П. Политюков

Обнинский институт атомной энергетики НИЯУ МИФИ, г. Обнинск



Разработана математическая модель линейного стохастического фильтра для оборудования АЭС в условиях старения с учетом разнородной информации об объекте, в частности, для трубного пучка ПГ в условиях растущей коррозионной трещины. Обосновано применение теории мартингалов для прогнозирования технического состояния оборудования. Сформулирован принцип оптимальности для выбора последовательности превентивных действий, направленных на снижение интенсивности процессов старения.

Ключевые слова: прогнозирование ресурса, фильтрация, алгоритм, принцип оптимальности, мартингал.

Key words: lifetime prediction, filter, algorithm, optimum principle, martingale.

Тепломеханическое оборудование АЭС относится к классу высоконадежных объектов, отказы которого недопустимы ввиду дороговизны и трудностей, связанных с досрочной заменой, а техническое состояние определяет возможность дальнейшей эксплуатации. В этом случае оценка технического состояния и прогнозирование остаточного ресурса должны быть основаны не на статистике отказов, как для восстанавливаемого оборудования, а на информации о процессах старения в металле объекта, условиях эксплуатации и данных эксплуатационного контроля [1, 2]. В силу неполноты математических моделей процессов деградации, флуктуаций параметров эксплуатации и погрешностей, связанных с контролем, точность оценки и прогноза будет ословливаться качеством восстановления значений процесса старения из недостаточно определенных данных. Для решения задачи индивидуального прогнозирования ресурса предлагается использовать линейный стохастический фильтр [3, 4], способный учитывать не только изменение условий эксплуатации, но и проводимые мероприятия на объекте, направленные на снижение интенсивности процесса деградации. Управление ресурсом в этом случае заключается в оптимальном выборе превентивных мер и момента их применения.

В общем случае интенсивность процесса старения может быть выражена уравнением [3, 5]

$$\frac{d}{dt} \omega_{\sigma}(t) = f_1(U) \omega_{\sigma}(t) + f_2(U), \quad (1)$$

$$\omega_{\sigma}(0)=0, \quad \omega_{\sigma}(t_B)=\omega_B, \quad (2)$$

где ω_B – предельное значение процесса старения. Вектор-параметр U , или вектор управления, объединяет все параметры, определяющие процесс старения, а область, в которой они могут меняться, обозначим через W . Пусть Δ_i – интервал времени между наблюдениями, тогда время наблюдения $t_n = \sum_{i=1}^n \Delta_i$. Если интервалы между наблюдениями одинаковые, то $t_n = n\Delta$. Разностное уравнение, соответствующее дифференциальному уравнению (1), с вектором управления U тогда можно представить в виде

$$\omega_{n+1} = \omega_n (1 + \Delta_n f_1(U)) + \Delta_n f_2(U).$$

В работе [3] предлагаемая модель наблюдений представлена в виде следующего рекуррентного случайного процесса $\eta_n = \{\omega(\Delta_n, x)\}$:

$$\eta_{n+1} = A_n(U)\eta_n + B_n(U) + F_n(U)N_n, \quad (3)$$

$$v_n = \xi_n + G_n(U)N_n, \quad (4)$$

$$\xi_n = C_n(U)\eta_n, \quad (5)$$

где η_0 – гауссовская величина; n – номер момента наблюдения, или номер ППР; N_n – белый шум; матрицы $A_n(U)$, $B_n(U)$, $F_n(U)$, $G_n(U)$ описаны в [3], причем $B_n(U)$ – детерминированная; вектор v_n в соответствии с условиями эксплуатации – наблюдение (результат контроля); (η_n, ξ_n) в силу условий эксплуатации парогенератора является частично наблюдаемой гауссовской последовательностью. К системе (3)–(5) применим одношаговый предиктор Калмана-Балакришнана [4]. Обозначим оценку состояния как $\hat{x}_{n+1} = M[\eta_{n+1} / v_n, \dots, v_1]$, $n \geq 1$ (предсказание на один шаг вперед по данным всех предыдущих измерений v_n, \dots, v_1), где $M[*/*]$ – условное математическое ожидание, \hat{x}_0 – гауссовская величина, $M[*]$ – математическое ожидание. Одношаговый предиктор будет иметь вид

$$\bar{x}_n = A_{n-1}(I - K_{n-1} \cdot C_{n-1})\bar{x}_{n-1} + B_{n-1} + A_{n-1} \cdot K_{n-1} v_{n-1}, \quad (6)$$

$$\hat{x}_n = \bar{x}_n + K_n(v_n - C_n \bar{x}_n), \quad \bar{x}_0 = M[\eta_0], \quad (7)$$

где матрицы $K_n = P_n C_n^* (G_n G_n^*)^{-1}$; $P_n = [1 + H_{n-1} C_n^* (G_n G_n^*)^{-1} C_n]^{-1} H_{n-1}$;

$H_{n-1} = A_{n-1} P_{n-1} A_{n-1}^* + F_{n-1} F_{n-1}^*$; $P_0 = M[(x_0 - \hat{x}_0)(x_0 - \hat{x}_0)^*]$; I – единичная матрица, а матрица K_n называется коэффициентом усиления и является решением уравнения Винера-Хопфа.

Природа процесса старения может быть различной в зависимости от рассматриваемого оборудования и условий его эксплуатации. Примером может быть такой сложный объект, как парогенератор (ПГ). Одним из критериев безотказной работы ПГ является целостность трубного пучка, который является незаменимым элементом ПГ и состоит из большого количества теплообменных трубок (ТОТ).

В работах [3, 5] для решения задачи прогнозирования ресурса теплообменных трубок парогенератора (ТОТ ПГ) разработан алгоритм линейной стохастической фильтрации и сформулирован принцип оптимального управления ресурсом ПГ.

Разработанный метод применим к процессу роста коррозионной трещины в материале теплообменных трубок ПГ в соответствии с уравнением Пэриса

$$\frac{dl}{dt} = C \cdot K_I^m, \quad (8)$$

где l – глубина трещины в м; K_I – коэффициент интенсивности напряжений (КИН), МПа·м^{1/2}; t – время; C, m – константы материала; для поверхностной полуэллиптической трещины глубиной l $K_I = \sigma \cdot \sqrt{\pi \cdot l}$; σ – механическое напряжение, МПа. После подстановки K_I в формулу (8) получим

$$\frac{dl}{dt} = C \cdot \sigma^m \cdot \pi^{m/2} \cdot l^{m/2}. \quad (9)$$

Следует отметить, что предельным состоянием трубного пучка является количество заглушенных трубок χ , причем каждая трубка глушится при достижении глубиной трещины уровня $d\%$ от толщины стенки («нехватка металла» $d\%$).

Во время проведения планово-профилактических работ (ППР) вихретоковым методом измеряется величина нехватки материала (глубина поверхностной трещины) выбранной трубки, т.е. элементы гауссовского вектора $\eta_n = \{z_m(\Delta_n, x)\}$, где m – количество рассматриваемых трубок.

Этот измерительный процесс можно представить как

$$\xi_n = C_n \cdot \eta_n. \quad (10)$$

Матрица C_n – диагональная $m \times m$ и имеет на диагонали элементы $c_{ij} = 1$, если трубка под номером i рабочая и подверглась плановому осмотру с результатом измерения $v_i(x)$; $c_{ij} = 1$, если трубка рабочая и не подвергалась плановому осмотру, т.е. результат ноль, и $c_{ij} = 0$, если трубка заглушена. В данной модели будем предполагать, что замеры полные, т.е. контролируются все трубки.

Наблюдаемый гауссовский вектор v_n (т.е. вектор, полученный при измерении нехватки металла в n -й ППР) представим в виде

$$v_n = \xi_n + G_n N_n,$$

где $G_n N_n$ – шумы измерительного процесса.

В результате наблюдаемый линейный процесс деградации каждой из m трубок трубного пучка запишем в виде

$$v_n = \xi_n + G_n N_n, \quad (11)$$

$$\xi_n = C_n \cdot \eta_n, \quad (12)$$

$$\eta_{n+1} = \eta_n + B_n + F_n \cdot N_n, \quad (13)$$

где n – номер ППР; B_n – вектор-столбец со значениями $\Delta_n \cdot C \cdot \sigma^m \cdot \pi^{m/2} \cdot K_h^{m/2}$, если трубка рабочая, и 0, если трубка заглушена: каждый столбец содержит информацию о состоянии m трубок по результатам n -го ППР.

Величина $F_n \cdot N_n$ представляет собой шум парогенератора между n и $(n+1)$ ППР, т.е. реакция на случайные флуктуации параметров эксплуатации (качество воды, содержание активаторов и т.д.), и моделируется как гауссовский процесс: N_n – белый шум с нулевым средним и единичной ковариацией – вектор длиной $2m$. Блочная матрица F_n подбирается так, чтобы вектор $F_n \cdot N_n$ имел нужную ковариационную матрицу.

Вектор $G_n \cdot N_n$ – гауссовский процесс, описывающий измерительный процесс при плановом осмотре или ремонте. Для построения матриц F и G используется соответствующая вспомогательная матрица R , которая является корреляционной (т.е. учитывает влияние поврежденных трубок на соседние) и имеет, например, вид

$$R = \begin{pmatrix} 1 & \delta & \dots & 0 \\ \delta & 1 & \dots & 0 \\ 0 & \delta & \dots & \delta \\ 0 & 0 & \dots & 1 \end{pmatrix},$$

где δ – некоторый корреляционный показатель, величина которого отражает степень взаимного влияния (в данном случае для соседних трубок). Более сложный вид имеет матрица R , в которой учитываются корреляции более удаленных трубок.

Матрицы F_n и G_n являются блочными. При этом выполняются необходимые условия $F_n \cdot G_n^* = 0$ (это равенство говорит о независимости сигнала, т.е. степени деградации материала трубок, и шума датчиков в процессе измерений в n -ом ППР, G_n^* – транспонированная матрица) и $\det G_n G_n^* \neq 0$ (это неравенство говорит об очевидной зависимости деградации материала от условий эксплуатации).

Для вновь построенного предиктора формулы расчета будут существенно проще:

$$\bar{x}_n = (E - K_{n-1} \cdot C_{n-1}) \bar{x}_{n-1} + B_{n-1} + K_{n-1} v_{n-1}, \quad (14)$$

$$\hat{x}_n = \bar{x}_n + K_n (v_n - C_n \bar{x}_n), \quad \bar{x}_0 = M[\eta_0], \quad (15)$$

где матрицы $K_n = P_n C_n^* (G_n G_n^*)^{-1}$; $P_n = [E + H_{n-1} C_n^* (G_n G_n^*)^{-1} C_n]^{-1} H_{n-1}$; $H_{n-1} = P_{n-1} + F_{n-1} F_{n-1}^*$;

$$P_0 = M[(x_0 - \hat{x}_0)(x_0 - \hat{x}_0)^*].$$

Эти формулы применимы как к отдельной теплообменной трубке, так и к трубному пучку размера m .

Процесс деградации необратим. Более того, можно показать, что он является субмартингалом. Покажем, что \hat{x}_{n+1} – последовательность после фильтра – субмартингал.

Покажем это на фильтре общего вида (6)–(7). По определению [6]

$\hat{x}_n = M(\eta_n | \mathfrak{I}_n)$, где $\mathfrak{I}_n = \sigma(\omega: v_1, v_2, \dots, v_n)$ – σ -алгебра, порожденная величинами (v_1, v_2, \dots, v_n) , причем справедлива цепочка вложений $\mathfrak{I}_1 \subseteq \mathfrak{I}_2 \subseteq \dots \subseteq \mathfrak{I}_n$, тогда

$$M(M(\hat{x}_{n+1} | \mathfrak{I}_n) | \mathfrak{I}_n) = M(\hat{x}_{n+1} | \mathfrak{I}_n) = M(\eta_{n+1} | \mathfrak{I}_n) = M(A_n \eta_n + B_n + F_n N_n | \mathfrak{I}_n).$$

Поскольку матрицы A_n, B_n – детерминированные, а N_n – белый шум, то $A_n M(\eta_n | \mathfrak{I}_n) + B_n \geq 0$ (P – п.н.).

Учитывая, что $B_n \geq 0$ и каждый элемент матрицы A_n больше либо равен нулю (после n -го ППР), то $M(\hat{x}_{n+1} | \mathfrak{I}_n) \geq A_n M(\eta_n | \mathfrak{I}_n)$.

Если учесть тот факт, что после проведенного ППР матрица A_n – диагональная, где на диагонали стоят величины, большие единицы на проверенных трубках, а остальные элементы диагонали – единицы на незаглушенных трубках (на заглушенных – нули), то справедливо неравенство $M(\hat{x}_{n+1} | \mathfrak{I}_n) \geq \hat{x}_n$ (P – п.н.), т.е. согласно [6], последовательность \hat{x}_{n+1} – субмартингал.

Это утверждение позволяет применить теорию мартингалов для прогнозирования количества заглушенных трубок. Так как последовательность $x_{n,k}$ (k – компонента вектора \hat{x}_n) образует неотрицательный субмартингал, обозначим через β_n случайную величину числа пересечений уровня d_k снизу вверх случайной величиной $\hat{x}_{n,k}$. Применяя неравенство Д. Дуба [6], получим

$$M(\beta_{n,k}) \leq \frac{M(\hat{x}_{n,k})}{d_k},$$

где $\hat{x}_{n,k} = \bar{x}_{n,k} + K_{n,k} (v_{n,k} - C_{n,k} \bar{x}_{n,k})$.

В этом неравенстве уровни d_k можно выбирать разными, чтобы получить представление о количестве трубок с различной нехваткой металла (рис.1). Задача

может быть решена и для одного предельного значения d , являющегося критерием глушения трубок.

Найдя трубки, достигшие предельного уровня d , мы тем самым определяем оптимальный план глушения ТОТ (в силу предиктора Калмана-Балакришнана) в следующий ППР.

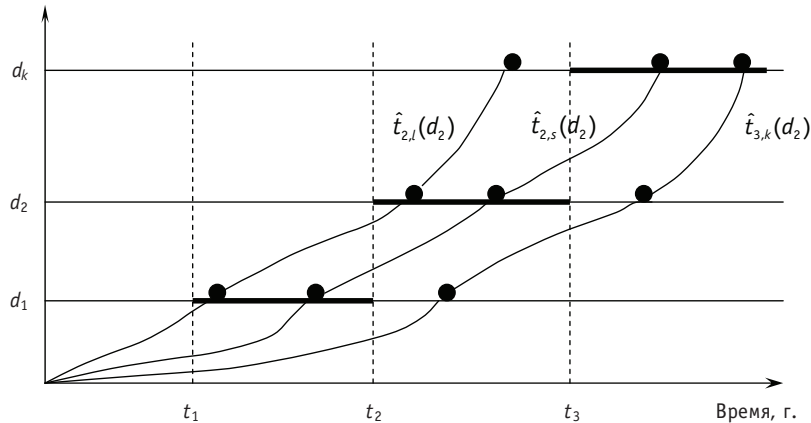


Рис. 1. Количество трубок с различной нехваткой металла: $\hat{t}_{n,k} = M(t_{n,k} | \mathcal{S}_n)$ – ожидаемое время пересечения уровня после n -го ППР трубкой с номером k

На рисунке помечены ожидаемые времена пересечения уровня d_2 трубками с номерами k, l, s .

Замечание. В силу условий проведения ППР вектор

$$v_n = \xi_n + G_n N_n$$

определен не для всех трубок (это относится к задаче управления мартингалами с неполными данными). В данной модели, сформулированной для полных данных, для получения полного вектора необходимо заполнить пропущенные измерения, например, линейной интерполяцией. Матрица C_n в зависимости от выбранной модели фильтра может быть различной и необязательно диагональной.

Сформулированный в работе [3] принцип оптимальности позволяет путем вариационных расчетов определить необходимые превентивные мероприятия и моменты их применения.

МОДЕЛЬ ОПТИМИЗАЦИИ УПРАВЛЕНИЯ РЕСУРСОМ

При наблюдении за трубным пучком ПГ обозначим через $t_{n+1,k}(d)$ k -ю траекторию (траекторию старения k -ой трубки), достигшую уровня деградации d в момент времени $(n+1)$. Так как последовательность h_n монотонна (P – п.н.) и гауссовская, то последовательность $t_{n+1,k}(d)$, полученная в результате решения задачи (3)–(5), в силу линейности и положительности обратного оператора к системе (1)–(2) также монотонна и гауссовская: $t_{n,k}(d) \leq t_{n+1,k}(d)$ (P – п.н.). Рассмотрим функционал

$$T(U) = M(t_n(d, x), t_n^*(d, x)),$$

где $M(t_n, t_n^*)$ – математическое ожидание от скалярного произведения, а сумма в скалярном произведении берется по трубкам, достигшим уровня деградации d .

Определим управление U_n^0 ресурсом парогенератора как оптимальное, если

$$\begin{aligned} T(U_n^0) &= \sup T(U), \\ E(U) &\leq E_{\text{lim}} \quad U \in W. \end{aligned} \quad (16)$$

Здесь второе условие необходимо, т.к. должны быть учтены затраты, требующиеся при любом воздействии на параметры. Каждая из мер в определенной степени снижает интенсивность процесса старения, что увеличивает время до выхода наблюдаемого процесса за допустимые пределы и тем самым приводит к увеличению ресурса установки в целом.

Смысл предложенного определения заключается в следующем: среди всех воздействий на ресурс парогенератора (концентрации хлорид-иона, кислорода, средней удельной загрязненности, типа амина и других параметров) необходимо найти такое, которое максимально увеличивает время до пересечения траекториями уровня деградации d при условии, что экономические затраты не превышают некоторой предельной величины.

Предложенная модель наблюдений и управления (11)–(13) и (16) предназначена для того, чтобы уменьшить число заглушенных трубок между ППР и тем самым увеличить ресурс установки.

Литература

1. Острейковский В.А., Сальников Н.Л. Вероятностное прогнозирование работоспособности элементов ЯЭУ. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 416 с.
2. Антонов А.В., Никулин М.С. Статистические модели в теории надежности. – М.: Абрис, 2012. – 319 с.
3. Гулина О.М., Корниенко К.А., Политюков В.П., Фролов С.А. Применение метода стохастической фильтрации Калмана для прогнозирования ресурсных характеристик парогенератора АЭС // Атомная энергия, 2006. – Т. 101 (4). – С. 313–316.
4. Балакришнан А.В. Теория фильтрации Калмана. – М.: Мир, 1988. – 168 с.
5. Гулина О.М., Павлова М.Н., Политюков В.П., Сальников Н.Л. Оптимальное управление ресурсом парогенератора АЭС // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2008. – № 4. – С. 25–30.
6. Ширяев А.Н. Вероятность. – М.: Наука, 1982. – 581 с.

Поступила в редакцию 16.02.2012

ABSTRACTS OF THE PAPERS

УДК 621.039.5: 621.362

Indirect Method of Determining the Efficiency of a Thermionic Reactor for Space \A.I. Brezhnev, E.G. Vinogradov, V.A. Linnik, M.K. Ovcharenko, A.P. Pyshko, Yu.S. Yuryev, V.I. Yarygin; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2012. – 9 pages, 1 illustration. – References, 4 titles.

The method of determining the efficiency of the space nuclear thermionic power plant by the set of current-voltage characteristics without the direct measurement of the reactor thermal power, yet with fixing the relative thermal power for various current-voltage characteristics is described.

УДК 621.039.51

On ADS Subcritical Reactor Operation in the Reactivity Modulation Mode \A.V. Gulevich, O.F. Kukharchuk, A.I. Brezhnev; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2012. – 7 pages, 2 tables, 9 illustrations. – References, 18 titles.

In the present paper consideration is given to the possibility of applying a pulsed reactor as a neutron-breeding target for accelerator-driven systems. It is assumed that such a reactor operates in the reactivity modulation mode similar to that of the IBR-2 reactor. In theory, it enables energy requirements for the accelerator beam to be reduced, while at the same time enhancing the safety of installations of this type.

УДК 621.039.51

Analysis of the BOR-60 Cells Utilization to Carry out Experiments \I.Yu. Zhemkov, Yu.V. Naboishchikov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2012. – 10 pages, 12 illustrations. – References, 6 titles.

The efficiency of BOR-60 core cells and blanket utilization to carry out experiments was analyzed for the 40-year operating period. Reactor cells that are used the most often to carry out experiments as well as the parameters influencing their attractiveness were identified.

УДК 621.039.543.6

Methodology of Conversion of Plutonium of Various Isotopic Compositions to the Equivalent Plutonium as Applied to System Studies in Nuclear Power \E.M. Yatsenko, A.N. Chebeskov, V.S. Kagramanyan, A.G. Kalashnikov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2012. – 11 pages, 3 tables, 3 illustrations. – References, 10 titles.

In this work the simplified methodology of correction of the initial enrichment, based on plutonium equivalent of uranium, plutonium, americium, neptunium, curium isotopes on loading is offered. The developed methodology, possessing comprehensible accuracy, allows not only to correct enrichment, but also to lower uncertainty degree at carrying out of system researches of atomic engineering taking into account dynamics of change of fuel isotopic composition at its multiple recycle in fast reactors.

УДК 621.039.51

Software Analysis of in-core monitoring system and reporting on the state of the reactor core of VVER-1000 KARUND \R.R. Alyev, S.T. Leskin; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2012. – 9 pages, 1 table, 5 illustrations. – References, 13 titles.

On the basis of algorithms [2], [3] developed a software system KARUND whose function is to monitor the state of the measuring system of RMC, software in-core monitoring system, core VVER-1000 reactor, and visual representation in the form of information to the operator. Completed description of the main modes of operation of the program and. Partially, describes the interface software system KARUND and some results.

УДК 621.039.58

Lifetime NPP Equipment Management Under Ageing by System Analysis Procedures \O.M. Gulina, N.L. Salnikov, V.P. Politukov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2012. – 6 pages, 1 illustration. – References, 6 titles.

Mathematical model of linear stochastic filter is developed for NPP equipment under ageing. Theory of martingales usage is substantiated to predict the technical state of equipment. Also there is formulated optimum principle for choice of preventive actions to decrease damage processes rate.

УДК 621.039.58

Prediction of NPP Equipment Lifetime under Flow-Accelerated Corrosion by Using of Empirical Model \O.M. Gulina, O.O. Frolova; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2012. – 9 pages, 3 tables. – References, 8 titles.

To predict equipment lifetime under flow-accelerated corrosion there is used Chexal-Horowitz empirical model, realized as ECW-02. One of the most important parameters is Keller coefficient of pipe geometry. To adapt Chexal model to Russian NPP units there is developed procedure of Keller coefficient estimation by using of control data and ECW-02 prediction. As result, stochastic characteristics of Keller coefficients are obtained. To estimate the error connected with admixture content in metal on erosion-corrosion wear rate there is performed comparison of wear rate calculated by using of Durex equation and the one predicted by ECW-02.

УДК 621.039.58

Efficiency Criteria for High Reliability Measured Systems Structures \N.L. Salnikov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2012. – 5 pages, 2 illustrations. – References, 3 titles.

To develop high reliability measured systems usually there are used procedures of structural redundancy. To estimate efficiency of such structures there is developed criteria to compare different systems. So it is possible to develop more exact system by inspection of redundant system data unit stochastic characteristics in according with developed criteria.

УДК 504.064.36: 574

Application of the Method of Electrophysical Impact on the Disperse Medium in High-Performance Filtering Gases Devices from Aerosols of Various Origin \I.V. Yagodkin, A.M. Posagennikov, A.G. Grishin, V.P. Melnikov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2012. – 9 pages, 6 illustrations. – References, 3 titles.

Cleaning of gas-air flows in different branches of industry remains one of the most important directions in the field of technologies of environmental protection from aerosols of the different origin, including radioactive and toxic ones.

High-efficient aerosol filters being used today at NPP are the source of large volumes of radioactive waste subject to burial. They have a limited lifetime, and their fabrication and operation are costly.

The situation arisen with gas cleaning from radioactive and toxic aerosol particles at NPP requires, on the one hand, updating of traditional approaches and, on the other hand, development of fundamentally new methods and aids of air cleaning, namely, the principle of combined cleaning based on the fact that particles take up specific properties in ionized gas and then are to be caught on filters.

The problems of experimental investigation of the effect of intensive aeronization on catching of aerosol particles from the air flow using combined filtering systems is the subject of this paper.

УДК 621.039.534

Experimental Study of Flow Hydrodynamics Lead Coolant and Water through the Experimental Section «Throttle Clearance-Ring» \A.V. Beznosov, M.A. Antonenkov, T.A. Bokova, M.V. Yarmonov, K.A. Makhov, A.A. Molodtsov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2012. – 11 pages, 1 table, 7 illustrations. – References, 2 titles.

A research and comparison of the hydraulic characteristics of the water and lead coolant ($T = 400\text{--}500^\circ\text{C}$) flow in the system of local hydraulic resistances «throttle-annular gap» have been done at the Alekseev Nizhny Novgorod State Technical University. During the experiments the magnitude of the relative clearance ($2\Delta/d = 0,018; 0,036; 0,056$) was varied with the static and rotated shaft. The average speed inside the annular gap ranged between 0,01 and 0,1 m/sec, the coolant was saturated with the oxygen.